

ISSN: 2757-9255



ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ DERGİSİ

ÇUKUROVA UNIVERSITY
JOURNAL OF THE FACULTY OF
ENGINEERING

MART
MARCH
2025

Cilt/Volume 40

Sayı/Issue 1



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



Sahibi (Owner)

Ali KESKİN
Ç.Ü. Mühendislik Fakültesi Dekanı

Editör (Editor)

Serin MEZARCIÖZ

EDİTÖR KURULU (Editorial Board)

Ali KESKİN (Çukurova Üniversitesi)
Umut ORHAN (Çukurova Üniversitesi)
Mutlu AVCI (Çukurova Üniversitesi)
Mustafa GÖK (Çukurova Üniversitesi)
Hüseyin VAPUR (Çukurova Üniversitesi)
Hüseyin AKILLI (Çukurova Üniversitesi)
Ulus ÇEVİK (Çukurova Üniversitesi)
Ali KOKANGÜL (Çukurova Üniversitesi)
Mesut BAŞIBÜYÜK (Çukurova Üniversitesi)
Hacı Murat ARSLAN (Çukurova Üniversitesi)
Oğuz DEMİRYÜREK (Erciyes Üniversitesi)
Hüsamettin BULUT (Harran Üniversitesi)
Metin GÜRÜ (Gazi Üniversitesi)
Mehmet Emin AYDIN (University of the
West of England, İngiltere)
Azra BİLGİN (University of Colorado Boulder,
ABD)

Serin MEZARCIÖZ (Çukurova Üniversitesi)
Hasan ÇETİN (Çukurova Üniversitesi)
Özen KILIÇ (Çukurova Üniversitesi)
Hüseyin ERTEN (Çukurova Üniversitesi)
Belgin BAYAT (Çukurova Üniversitesi)
Mustafa ÖZCANLI (Çukurova Üniversitesi)
R. Tuğrul OĞULATA (Çukurova Üniversitesi)
Onur ERMAN (Çukurova Üniversitesi)
Yusuf KUVVETLİ (Çukurova Üniversitesi)
Hüseyin R. YERLİ (Çukurova Üniversitesi)
Ergun ERÇELEBİ (Gaziantep Üniversitesi)
Nihan ÇETİN DEMİREL (Yıldız Teknik Üniversitesi)
Serter ATABAY (American University of Sharjah,
United Arab Emirates)
Muammer KOÇ (Hamad Bin Khalifa University,
Qatar)
Tamio ENDO (Mie University-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 – (322) 338 70 50 E-posta: 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 gelişmelerine 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. Tüm mühendislik alanları ile ilgili teorik/deneysel ve uygulamaya yönelik çalışmalar Dergi'nin ilgi alanındadır. Çeviri ve derleme makaleler kabul edilmemektedir. “**Araştırma ve uygulama içeren makaleleri**” yayımlanmaktadır.

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. Theoretical/experimental and practical studies related to all engineering fields are in the scope of the Journal. Translation and compilation articles are not accepted. The journal publishes “**articles of research and practice**”.



İÇİNDEKİLER

- Amik Ovasında Buharlaştırma Tahmini için Çoklu Çıktılı Yapay Sinir Ağları Modeli..... 1**
Multiple Output Artificial Neural Network Model for Evaporation Estimation in Amik Plain
Samed GÖÇMEN, Fatih ÜNEŞ, Bestami TAŞAR, Ömer Faruk CANSIZ
- Türkiye'nin Büyük Şehirlerinde Yaz Aylarında Cam Filmi Kullanımı ile Isı Kazancı Kestirimi ve Maliyet Analizi..... 17**
Heat Gain Estimation with Window Film Application in Some Major Cities of Turkey during Summer and Related Cost Estimation
Erdem Onur ÖZYURT, Mehmet Gökhan GÖKÇEN, Mehmet İPEKOĞLU
- Remote Sensing-Based Deep Learning Approach for Identifying Burned Forest Areas..... 33**
Yanmış Orman Alanlarının Belirlenmesi için Uzaktan Algılama Tabanlı Derin Öğrenme Yaklaşımı
Reha PAŞAOĞLU, Ahmet Ertuğrul ARIK, Nuri EMRAHOĞLU
- Improving of Thixotropic Properties of Bentonite Dispersions in Rheological Applications 49**
Reolojik Uygulamalarda Bentonit Dispersiyonlarının Tiksotropik Özelliklerinin İyileştirilmesi
Onur Eser KÖK, Hüseyin VAPUR, Yasin ERDOĞAN
- Experimental Investigation of Local Flexible Surface on Aerodynamic Effects for Finite Wing with NACA0018 Section 61**
NACA0018 Kesitli Sonlu Kanat için Yerel Esnek Yüzey Aerodinamik Etkilerinin Deneysel İncelenmesi
Ali Emirhan EROĞLU, Tahir DURHASAN, Javad Rashid JAFARİ, İlyas KARASU
- SWARA-MOORA Yöntemi ile Depolama Sistemi Seçimi 69**
Selection of a Warehouse System Using the SWARA-MOORA Method
Melek IŞIK, Kübra BOLAHATOĞLU
- Distribution Network Reconfiguration for Voltage Profile Enhancement and Power Loss Reduction Under Hourly Energy Consumption Using Quantum Approximate Optimization Algorithm 79**
Kuantum Yaklaşık Optimizasyon Algoritması Kullanılarak Saatlik Enerji Tüketimi Altında Güç Kaybının Azaltılması ve Gerilim Profiline İyileştirilmesi için Dağıtım Şebekesinin Yeniden Yapılandırılması
Nisa NACAR ÇIKAN

IEEE 13-Baralı Dengesiz Üç Fazlı Güç Dağıtım Sistemlerinde Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Optimum Konumlandırılması ve Boyutlandırılması	89
<i>Optimal Placement and Sizing of Renewable Energy Sources in the IEEE 13-Bus Unbalanced Three-Phase Power Distribution System</i>	
Murat ÇIKAN	
Mechanical Properties of LLDPE Composites Reinforced with Woven Horsehair Fabrics	99
<i>At Kılı Dokuma Kumaşlar ile Takviye Edilmiş LLDPE Kompozitlerin Mekanik Özellikleri</i>	
Sümeyye ÜSTÜNTAĞ	
Performance Analysis of Additive Manufacturing of Electrodes via Selective Laser Sintering for Green Hydrogen Production	111
<i>Yeşil Hidrojen Üretimi için Seçici Lazer Sinterleme Yoluyla Elektrotların Eklemeli İmalatının Performans Analizi</i>	
Fırat EKİNCİ, Mehmet Erman MERT, Hüseyin NAZLIGÜL, Başak DOĞRU MERT, Burak ESENBOĞA, Abdurrahman YAVUZDEĞER	
Küresel İklim Değişikliği ve İklim Göstergelerindeki Tarihsel Eğilimler	127
<i>Global Climate Change and Historical Trends in Climate Indicators</i>	
Muhammet TOKMAKÇI, Mehmet BİLGİLİ, Engin PINAR	
Aktivasyon Kimyasal Türlerinin Metilen Mavisi Adsorpsiyonuna Etkilerinin İzoterm ve Kinetik Modelleri Kullanılarak İncelenmesi	141
<i>Investigation Effects of Activating Agent Types on Methylene Blue Adsorption with Using Isotherm and Kinetic Models</i>	
İsmail Yiğit SEÇKİN	
Development of a Material Selection Software for DC-DC Converters Using Python	153
<i>Python Kullanılarak DC-DC Dönüştürücüler İçin Malzeme Seçim Yazılımının Geliştirilmesi</i>	
Oğuzhan TİMUR	
Design and Experimental Verification of an Origami Based Compact Helix Antenna with High Gain Characteristics	171
<i>Yüksek Kazanç Özelliklerine Sahip Origami Tabanlı Kompakt Heliks Anten Tasarımı ve Deneysel Doğrulaması</i>	
Fatih Özkan ALKURT	
İki Boyutlu Kesme ve Çizelgeleme Problemi için Bütünleşik Bir Matematiksel Model ve Bir Matsezgisel Algoritma	179
<i>An Integrated Mathematical Model and a Matheuristic Algorithm for the Two-Dimensional Cutting and Scheduling Problem</i>	
Tuğba SARAÇ, Büşra TUTUMLU	
Production of Organo-Modified and Amino-Functional Silicone Finishing Chemicals and Their Effects on The Handle and Color Values of Cotton Knitted Fabrics	193
<i>Organo Modifiye ve Amino Fonksiyonel Silikon Apre Kimyasallarının Üretimi ve Pamuklu Örme Kumaşların Tuşe ve Renk Değerlerine Etkisi</i>	
Aslıhan KORUYUCU	

XGBoost (Aşırı Gradyan Artırılmış Karar Ağaçları) ile Hidroelektrik Enerji Tahmini	205
<i>Hydroelectric Power Forecasting via XGBoost (Extreme Gradient Boosted Decision Trees)</i>	
Bektaş Aykut ATALAY, Kasım ZOR	
Assessment of the Change in Hardness of Particulated Intraply Carbon/Aramid Reinforced Composites After UV Aging	219
<i>UV Yaşlandırma Sonrası Parçacıklı Katman İçi Karbon/Aramid Takviyeli Kompozitlerin Sertlik Değişiminin Değerlendirilmesi</i>	
Zeynal Abidin OĞUZ	
Numerical Investigation of Compressive Strength of Structural Steel Material Under Different Loads According to ASTM D695 Standard	227
<i>Yapısal Çelik Malzemenin Farklı Yükler Altındaki Basınç Dayanımının ASTM D695 Standardına Göre Sayısal Olarak İncelenmesi</i>	
Muhammed Safa KAMER	
Sustainable Energy and Turkey: The Role of Geothermal Energy and Energy Planning	239
<i>Sürdürülebilir Enerji ve Türkiye: Jeotermal Enerji ve Enerji Planlamasının Rolü</i>	
Manolya GÜLDÜREK	

Amik Ovasında Buharlaştırma Tahmini için Çoklu Çıktılı Yapay Sinir Ağları Modeli

Samed GÖÇMEN^{1,a}, Fatih ÜNEŞ^{1,b}, Bestami TAŞAR^{1,c}, Ömer Faruk CANSIZ^{1,d}

¹İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hatay

^aORCID: 0009-0003-1854-3206; ^bORCID: 0000-0001-5751-6970; ^cORCID: 0000-0003-4842-3937; ^dORCID: 0000-0001-6857-2513

Makale Bilgileri

Geliş : 02.05.2024

Kabul : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665422

Sorumlu Yazar

Samed GÖÇMEN

sgocmen@mku.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Yapay sinir ağları (YSA),

Çoklu doğrusal regresyon (MLR)

Buharlaştırma

Evapotranspirasyon

Atıf şekli: GÖÇMEN, S., ÜNEŞ, F., TAŞAR, B., CANSIZ, Ö.F., (2025). Amik Ovasında Buharlaştırma Tahmini için Çoklu Çıktılı Yapay Sinir Ağları Modeli. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(1), 1-15.

ÖZ

Yeryüzü su seviyesinde önemli miktarda kayıplara sebep olan buharlaştırma, su kaynakları mühendisliğinin projelendirilmesi, suyun idaresi ve kontrolü gibi konularda önem taşımaktadır. Bu çalışma, Amik Ovası'nda aylık buharlaştırma tahminini geliştirmek amacıyla çoklu çıktılu yapay sinir ağları (YSA) modelini kullanmaktadır. Geleneksel tahmin yöntemlerine kıyasla YSA'nın daha düşük hata oranı ile tahmin yapabildiği görülmüştür. Veriler 1970-2025 yılları arasında toplanmış ve model eğitiminde kullanılmak üzere ön işleme tabi tutulmuştur. Modelin doğruluğu R², KOH ve YOH gibi istatistiksel ölçütler ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, YSA modelinin buharlaştırma tahmininde başarılı olduğunu ve özellikle yarı kurak bölgelerde uygulanabilirliğini göstermektedir. Modelin farklı iklim bölgelerinde test edilmesi önerilmektedir. Öte yandan çoklu çıktılu yapay sinir ağları (YSA) modeli buharlaştırma çalışmalarında ilk defa denenmesine rağmen oldukça iyi sonuçlar vermiştir.

Multiple Output Artificial Neural Network Model for Evaporation Estimation in Amik Plain

Article Info

Received : 02.05.2024

Accepted : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665422

Corresponding Author

Samed GÖÇMEN

sgocmen@mku.edu.tr

Keywords

Artificial neural networks (ANN)

Multiple linear regression (MLR)

Evaporation

Evapotranspiration

How to cite: GÖÇMEN, S., ÜNEŞ, F., TAŞAR, B., CANSIZ, Ö.F., (2025). Multiple Output Artificial Neural Network Model for Evaporation Estimation in Amik Plain. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(1), 1-15.

ABSTRACT

Evaporation, which causes significant losses in the earth's water level, is important in matters such as water resources engineering project design, water management and control. This study uses a multiple-output artificial neural network (ANN) model to improve monthly evaporation estimation in the Amik Plain. It has been observed that ANN can make estimations with lower error rates compared to traditional estimation methods. Data were collected between 1970-2025 and preprocessed to be used in model training. The accuracy of the model was evaluated with statistical measures such as R², RMSE and MAE. The results show that the ANN model is successful in evaporation estimation and is especially applicable in semiarid regions. It is recommended to test the model in different climatic regions. On the other hand, although the multiple-output artificial neural network (ANN) model was tried for the first time in evaporation studies, it gave quite good results.

1. GİRİŞ

Yeryüzündeki su seviyesinin değişimi, yapının kullanım amacı, projelendirilmesi, maliyeti gibi parametreleri doğrudan etkilediğinden dolayı; su seviyesinde azımsanmayacak azalmalara sebep olabilen buharlaşma, su mühendisliğinde; suyun idaresi ve su yapılarının planlanması gibi konularda önem taşımaktadır. Ekolojinin ve hidrolojinin temel bileşenlerinden olan buharlaşma, suyun sıvı fazdan katı faza geçmesi olarak tanımlanmaktadır. Buharlaşma; sıcaklık değişimi, bağıl nem, basınç değişimi, güneş ışınlarının radyoaktif etkileri, çevresel faktörler gibi birçok değişkenden etkilenmektedir. Bu durumda buharlaşma için genel geçer bir yaklaşım bulmak ya da çözüm üretmek oldukça zordur. Zira buharlaşmayı etkileyen faktörler oldukça fazladır ve bu faktörlerin değişimi genellikle birbiri ile bağlantılı değildir ya da artış-azalışları doğrusal olmayabilir. Buharlaşma tahmini için, Penman, Hargreaves-Samani, Ritchie ve Turc yöntemleri gibi geleneksel yöntemler kullanılmaktadır. Ancak, buharlaşmaya etkiyen parametrelerin çokluğu, parametrelerin doğal olaylar olması sebebi ile değerlerin doğrusal olmaması ve aralarındaki tutarsızlık, klasik yöntemler ile çözüm yapmayı oldukça zorlaştırmaktadır. Teknolojinin ilerlemesi, yapay zeka tekniklerinin gelişmesi gibi etkenler, bilim insanlarını buharlaşmanın tahmini için daha az parametre ile hızlı ve kabul edilebilir sonuçlar verebilecek yeni yöntemler aramaya yöneltmiştir. “Doğal olaylar, birçok farklı değişkenden etkilenmektedir, ayrıca doğal olaylar ve değişkenler arasındaki doğrusal olmayan ilişkileri açıklamak oldukça güçtür. Bu nedenle, doğrusal olmayan problemlerin çözümü için ucuz ve kolay metotlar geliştirme yoluna gidilmiş ve yapılan araştırmalar incelendiğinde, buharlaşma miktarını belirlemek için halen çalışmaların sürdürüldüğü görülmüştür.” Taşar ve arkadaşları [1]. İklim değişikliği ve artan su ihtiyacı, buharlaşma tahmin modellerinin doğruluğunu artırma gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Buharlaşma, tarımsal sulama, su kaynakları yönetimi ve iklim değişikliği analizlerinde önemli bir parametredir. Geleneksel tahmin yöntemleri genellikle sınırlı girdilere dayanmakta ve bölgesel değişkenlikleri yeterince dikkate almamaktadır.

Bu çalışmada, Amik Ovası'nda aylık buharlaşma tahminini geliştirmek amacıyla çoklu çıktılı yapay sinir ağları (YSA) modeli kullanılmıştır. Modelin amacı, farklı hava durumu değişkenlerini kullanarak buharlaşma miktarını geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek doğrulukla tahmin etmektir.

Araştırmanın hipotezi, çoklu çıktılı YSA modelinin, geleneksel regresyon yöntemlerine kıyasla daha iyi tahmin sonuçları vereceği varsayılmaktadır. Bu bağlamda, çalışmada şu sorulara yanıt aranmıştır:

- YSA modeli, geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında daha düşük hata oranları verebilir mi?
- Model, farklı iklim koşullarında uygulanabilir mi?
- İklim değişikliği senaryoları doğrultusunda modelin öngörü gücü nasıldır?

Bu çalışma, literatürdeki mevcut tahmin modellerine katkı sağlamayı, bölgesel su yönetiminde ve tarımsal planlamada daha güvenilir bir buharlaşma tahmini modeli oluşturmayı hedeflemektedir.

Literatürde buharlaşma ve yapay zeka yaklaşımlarıyla buharlaşma tahminleri üzerine oldukça fazla çalışma bulunmaktadır. Verilerde tutarlılık ve daha sağlıklı kıyas yapmak adına özellikle yurt içinde yapılan çalışmalar incelendiğinde:

Terzi ve Keskin [2], Eğirdir Gölü buharlaşma tahmini için bölgeye ait 2001 ve 2002 yılları; sıcaklık, nem, rüzgâr ve radyasyon gibi meteorolojik verilerini kullanarak Yapay Sinir Ağları (YSA) modelleri geliştirmiştir. Ayrıca Penman metodu ile buharlaşma tahminleri yapmışlar ve sonuçları günlük tava buharlaşma değerleri ile karşılaştırdıklarında YSA modellerinin daha uyumlu sonuç verdiğini gözlemlemişlerdir. Doğan ve arkadaşları [3], Sapanca Gölü buharlaşma tahmini için bölgeye ait meteorolojik verileri kullanarak YSA ile “ileri beslemeli geri yayınlı (İBGYYSA) ve radyal temelli yapay sinir ağı (RTYSA) modeli” oluşturmuşlardır. Ayrıca Penman-Monteith (PM) metodu ile buharlaşma tahminleri yapmışlar ve üç yaklaşımın performansını karşılaştırdıklarında, İBGYYSA'nın daha yaklaşık sonuç verdiğini gözlemlemişlerdir. Dindar [4], Tahtaköprü Barajı aylık buharlaşma tahmini için bölgenin geçmiş yıllara ait meteorolojik verilerini kullanarak YSA modeli geliştirmiştir. YSA'dan aldığı sonuçları, yaygın yöntemler olan çoklu-lineer regresyon (MLR) ve otoregresif (AR(p)) modellerle elde ettiği sonuçlarla karşılaştırmış ve YSA sonuçlarının yaygın yöntemlere göre daha yaklaşık olduğunu gözlemlemiştir. Kişi ve Afşar [5], Kayseri, Kırşehir, Nevşehir ve Yozgat illerinden aldıkları meteorolojik

veriler ile “Çok katmanlı yapay sinir ağları (ÇKYSA), radyal tabanlı yapay sinir ağları (RTYSA), genelleştirilmiş regresyon yapay sinir ağları (GRYSA), bulanık yapay sinir ağı (ANFIS) ve çoklu doğrusal regresyon (MLR)” metotlarını kullanarak buharlaşma tahmini yapmışlardır. Sonuçları kıyasladıklarında, karekök ortalama karesel hata (KOKH), ortalama mutlak hata (OMH) ve korelasyon katsayıları (R) kriterleri açısından; her kriter için farklı illerde farklı yöntemlerin daha yakın sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir. Üneş ve arkadaşları [6], Tahtaköprü Barajı aylık buharlaşma tahmini için YSA ve klasik yöntemleri karşılaştırmışlardır. YSA'nın klasik yöntemlere göre daha yakın sonuçlar sağladığını gözlemlemişlerdir. Yıldız ve Güner. [7], Kayseri Sultan Sazlığı Bölgesi için meteorolojik verileri kullanarak YSA modelleri ve Penman metodu ile buharlaşma tahminleri yapmışlar ve sonuçları gerçek buharlaşma değerleri karşılaştırmışlardır. Ayrıca bölgede ölçülmüş olan yıllık tatlı su buharlaşmasının, yıllık tuzlu su buharlaşmasına oranla daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Gümüş ve arkadaşları [8], Adana ili için; sıcaklık, nem, rüzgar, basınç, güneşlenme süresi ve güneşlenme şiddeti parametrelerini kullanarak aylık buharlaşma tahmini yapmaya çalışmışlardır. Tahminde YSA, ANFIS ve Gen Ekspresyon Programlama (GEP) yöntemlerini kullanılmışlardır. Sonuçları karşılaştırdıklarında tüm yöntemlerin kabul edilebilecek sonuçlar verdiklerini ancak ANFIS'in tahminlerinin daha yaklaşık olduğunu gözlemlemişlerdir. Kaya ve arkadaşları [9], St. Johns, Florida, ABD, meteoroloji istasyonu verileri üzerinden; radyasyon, sıcaklık, rüzgar ve nem parametrelerini kullanarak “M5T Data Mining Method” ile buharlaşma tahmini yapmışlardır. Sonuçları Turc ampirik metodu ile karşılaştırmışlar ve M5T'nin daha yaklaşık sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir. Üneş ve arkadaşları [10], St. Johns, Florida, ABD, meteoroloji istasyonu verileri üzerinden; radyasyon, sıcaklık, rüzgar ve nem parametrelerini kullanarak doğrusal olmayan problemleri çözmeye daha yatkın bir yöntem olan “Support Vector Mechines (SVM)” ile buharlaşma tahmini yapmışlardır. Sonuçları Hargreaves-Samani metodu ile karşılaştırmışlar ve SVM'nin daha yaklaşık sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir. Mamak ve arkadaşları [11], Radyasyon, sıcaklık, rüzgar ve nem parametrelerini kullanarak ANFIS ile buharlaşma tahmini yapmışlardır. Sonuçları Penman Fao 56 metodu ile karşılaştırmışlar, ortalama kare hata ve ortalama mutlak hataya göre ANFIS'in daha yaklaşık sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir. Gümüş ve arkadaşları [12], sadece sıcaklık parametresini kullanarak, Şanlıurfa ve Diyarbakır illerinde YSA, ANFIS ve GEP yöntemleri ile buharlaşmayı tahmin etmeye çalışmışlardır. Sonuçlar incelendiğinde üç yöntemin de kabul edilebilir sonuçlar verdiği ve GEP yönteminden daha yaklaşık sonuçlar alındığını gözlemlemişlerdir. Özel [13], Konya, Karaman ve Aksaray İllerinin, yağış, sıcaklık, rüzgar hızı, nem ve basınç gibi meteorolojik verileri ile Konya Kapalı Havzasında; MLP-SCG, MLP-GDX, RTYSA, GRYSA, ANFIS, ϵ -DVR yapay zeka metotları ile buharlaşma tahminleri yapmıştır. FAO-Penman-Monteith, Priestley-Taylor, Meyer ve Romanenko ampirik denklemleri ile de sonuçlar bulmuştur. Sonuçları karşılaştırdığında yapay zeka yöntemlerinin daha yaklaşık sonuçlar verdiğini gözlemlemiştir. Taşar ve arkadaşları [1], Massachusetts, U.S.A (Cambridge Hazne ve havzası) bölgesinde, sıcaklık, rüzgar hızı, güneşlenme ve bağıl nem parametreleri üzerinden YSA ve Hargreaves-Samani, Ritchie ve Turc denklemi gibi ampirik yöntemlerle buharlaşma tahminleri yapmışlardır. Sonuçlar karşılaştırıldığında YSA'nın daha yaklaşık sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir. Üneş ve arkadaşları [14] Hartwell Gölü (Güney Karolina, ABD) bölgesinde sıcaklık, rüzgar hızı, radyasyon ve bağıl nem parametreleri üzerinden YSA ve Penman-Monteith, Hargreaves-Samani ve Turc denklemleri ile günlük buharlaşma tahminleri yapmışlardır. Sonuçları karşılaştırdıklarında günlük buharlaşma için YSA'nın daha yaklaşık sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir. Özel ve Büyükyıldız [15] Meteorolojik verilere ait parametrelerle oluşturdukları farklı kombinasyonlar ile Konya Kapalı Havzası'nda bulunan Karaman bölgesinde; YSA, Destek Vektör Regresyonu (DVR), ANFIS yöntemlerini kullanarak buharlaşma tahminleri yapmışlardır. Sonuçları karşılaştırdıklarında DVR'nin daha yaklaşık sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir. Doğan [16], Namazgâh barajına ait sıcaklık, rüzgar ve buhar basıncı parametrelerini kullanarak, buharlaşma tahmini için farklı YSA modelleri oluşturmuş ve oluşturduğu modeller arasında performans analizi yaparak en yaklaşık sonucu veren modeli bulmaya çalışmıştır. Yıldırım ve arkadaşları [17] Samsun, Bafra ve Çarşamba bölgelerinde; sıcaklık, nem, güneşlenme ve rüzgâr parametreleri üzerinden, YSA ve ANFIS metotları ile günlük buharlaşma tahminleri yapmışlardır. YSA ve ANFIS in sınırlı parametre koşullarında buharlaşma tahmini için yararlı olacağını saptamışlardır. Özdülkar ve arkadaşları [18] Lewisville Gölü yakınında (Texas, ABD) bölgesinde 2008-2012 yıllarına ait; sıcaklık, rüzgâr, radyasyon ve nem parametrelerini kullanarak, Mamdani ve Sugeno bulanık mantık metotları ile günlük buharlaşma tahmini yapmışlardır. Sonuçları karşılaştırdıklarında Sugeno yönteminin daha yaklaşık sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir. Üneş ve arkadaşları [19] De Soto County, (Florida, ABD) bölgesinde; sıcaklık, nem, rüzgâr hızı ve radyasyon verilerini kullanarak; M5T yeteneği; ANFIS; SVM;

Hargreaves-Samani, Ritchie, Turc ve Penman FAO 56 ampirik denklemler ve çok doğrusal regresyon (MLR) ile günlük referans buharlaşma tahminleri yapmışlardır. Sonuçları karşılaştırdıklarında: Ampirik yöntemler içerisinde Turc ampirik yönteminin daha iyi performans gösterdiğini; yaklaşık yöntemler içerisinde ise korelasyon katsayıları açısından ANFIS, minimum hatalar açısından SVM'nin daha iyi performans gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca tüm sonuçlarda yaklaşık yöntemlerin ampirik yöntemlere nazaran daha iyi performans gösterdiğini saptamışlardır. S. Doğan [20] Güney Carolina (ABD) Anderson Hartwell gölü bölgesine ait; sıcaklık, rüzgâr hızı, güneşlenme miktarı ve bağıl nem parametreleri ile Penman-Monteith metodu ile yaptığı buharlaşma tahminlerini referans kabul ederek, Hargreaves-Samani, ve Turc denklemleri gibi ampirik yöntemler ile YSA, Radyal Tabanlı Yapay Sinir Ağları (RTYSA), Çoklu Doğrusal Regresyon (MLR) yöntemleri ve Oto-regresif modelin AR(p) ile yaptığı buharlaşma tahminlerinin sonuçlarını kıyaslamıştır. YSA'nın diğer yöntemlere nazaran daha iyi performans gösterdiğini gözlemlemiştir. Üneş ve Kaya [21] Hatay Bölgesinde, hava sıcaklığı ve yağış parametrelerini kullanarak, Mann Kendall testi, Spearman's Rho, Regresyon testi ve Yenilikçi Şen Eğilimi metotları ile iklimsel trend değişimini tespit etmeye çalışmışlardır. Sonuç olarak bölgede, ortalama sıcaklıkta artış ve toplam yağış miktarında kayda değer bir azalış olduğunu gözlemlemişlerdir. Gümüş ve arkadaşları [22] Adıyaman ve Diyarbakır Bölgelerinde, sıcaklık, rüzgâr, nem, basınç, güneşlenme şiddeti ve aylık açık gün sayısı parametrelerini kullanarak, YSA, ANFIS ve Gen Ekspresyon Programlama (GEP) metotları ile aylık tava buharlaşma tahminleri yapmışlardır. Sonuçları karşılaştırdıklarında GEP'in daha yaklaşık sonuçlar sağladığını gözlemlemişlerdir. Üneş ve Kaya [21] Koşice (Slovakia) bölgesinde, radyasyon, nem, sıcaklık, ve rüzgâr hızı parametrelerini kullanarak; çok katmanlı algılayıcı (MLP), destek vektör regresyon (SVR), çoklu doğrusal regresyon (MLR) modelleri ile buharlaşma tahminleri yapmışlardır. Sonuçlar, kendi içlerinde ve Hargreaves Samani, Ritchie ve Turc ampirik yöntemleri ile bulunan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Ampirik yöntemlerden, Hargreaves-Samani denklemi Penman FAO 56 denkleminin birbirlerine daha uyumlu sonuçlar verdiğini ve MLP'nin diğer yapay zeka yöntemlerinden daha iyi performans gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Özdülkar [23] Lewisville Gölü (Texas, ABD) bölgesinde, sıcaklık, rüzgâr hızı, radyasyon ve bağıl nem parametreleri ile Penman Monteith denklemi, ANFIS, M5T, MLR ve Turc geleneksel denklemleri ile buharlaşma tahmini yapmıştır. Sonuçları değerlendirdiğinde ANFIS, M5T ve MLR yöntemlerinin daha yaklaşık sonuçlar verdiğini gözlemlemiştir. Tütüncü [24] Atatürk Barajı bölgesinde 2016-2019 yıllarına ait, sıcaklık, radyasyon, nem ve rüzgâr hızı parametreleri ile buharlaşma tahmini için farklı YSA modelleri oluşturmuş ve oluşturduğu modeller ile yaptığı buharlaşma tahminlerinin gerçek buharlaşma değerlerine %90 oranında yaklaşık sonuçlar elde ettiğini tespit etmiştir. Katipoğlu ve Acar [25] YSA ile veri sürekliliği çalışması yapmışlardır. Horasan İstasyonu sıcaklık verilerine ait eksik kayıtları oluşturdukları YSA modeli ile tahmin etmeye çalışmışlardır. 0,99 R² ve 0,61 OMH değerleri ile modelin eksik veriler için kullanılabilirliğini belirtmişlerdir. Gençoğlu ve Badem [26] Solar radyasyon, sıcaklık, rüzgar hızı ve nem değerlerini kullanarak, YSA ile oluşturdukları model ile Pan Buharlaşma tahminleri yapmışlardır. Oluşturdukları 36 YSA modelinin en başarılı olanı 0,86 R² ve 0,97 OMH performansı göstermiştir.

2. YÖNTEM

2.1. Materyal

Bu çalışmada Hatay Meteoroloji Müdürlüğünden temin edilen 1960-2020 yıllarına ait, Aylık Maksimum Nispi Nem (%), Aylık Maksimum Sıcaklık (°C), Aylık Minimum Nispi Nem (%), Aylık Minimum Sıcaklık (°C), Aylık Ortalama Aktüel basınç (hPa), Aylık Ortalama Maksimum Sıcaklık (°C), Aylık Ortalama Nispi Nem (%), Aylık Ortalama Rüzgar Hızı (m/s), Aylık Ortalama Sıcaklık (°C) verileri bağımsız değişkenler; Aylık Maksimum Açık Yüzey Buharlaşması (mm), Aylık Toplam Açık Yüzey Buharlaşması (mm) ve Aylık Toplam Buharlaşma Evapotranspirasyon (mm) parametreleri ise bağımlı değişkenler olarak kullanılmıştır.

Parametre olarak 60 yıl gibi geniş bir aralığa ait meteorolojik veriler kullanıldığından, bazı yıllara ait bağımlı ya da bağımsız değişken parametrelerine ulaşamamıştır. Eksik veriler, literatürde önerilen yöntemlere uygun olarak lineer enterpolasyon yöntemi ile doldurulmuştur. Bu yöntem, mevcut veri noktaları arasında doğrusal bir eğilim oluşturarak ara değerlerin tahmin edilmesini sağlamaktadır. Aykırı değerler ise Grubbs testi kullanılarak analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre %5'ten fazla sapma

gösteren veriler aykırı kabul edilerek model eğitime dahil edilmemiştir. Modelin performansı, eğitim, doğrulama ve test verileriyle ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Kullanılan metrikler: R², KOH ve YOH'dir. R² (Korelasyon, Regresyon); modelin açıklayıcılık yüzdesini, KOH (Karesel Ortalama Hata); Modelin ortalama hata büyüklüğünü, YOH (Yüzdesel Ortalama Hata); Gerçek ve tahmin edilen değerler arasındaki mutlak hata farklarını ifade eder.

2.2. Metodoloji

Çalışmada MATLAB 2021b versiyonu ile YSA metodu ve regresyon modelleri ile tahminler yapılmıştır. Regresyon modeli olarak; lineer, interaction, quadratic ve pure-quadratic regresyon modelleri kullanılmıştır. Buharlaşıma etkiyen parametrelerin çokluğu, parametrelerin doğal fenomenler olması sebebi ile değerlerin doğrusal olmaması ve aralarındaki tutarsızlık, klasik yöntemler ile çözüm yapmayı oldukça zorlaştırmaktadır. “Sezgisel algoritmalar, doğadaki canlıların davranış ve hareketlerinden esinlenerek geliştirilen zor problemlerin çözümlerine uygulanabilen ve yaklaşık çözümler üretebilen algoritmalar” [27]. YSA’da birden fazla değişkene bağlı doğrusal çözümü olmayan problemlerin çözümü için geliştirilmiş bir sezgisel yaklaşımdır. Ayrıca model için herhangi bir ön kabul şartı olmaması YSA’yı daha kullanışlı hale getirmektedir.

“Regresyon analizi, bağımlı değişkenler ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi ve bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenleri ne ölçüde etkilediğini belirlemede kullanılan bir yöntemdir.” [28]. Çalışmada kullanılan YSA modelleri Şekil 1’de görüldüğü gibi dokuz bağımlı değişkenden oluşan bir girdi katmanı, bir gizli katman ve üç bağımlı değişkenden oluşan çıktı katmanı olmak üzere üç katmanlı bir yapıya sahiptir. Bu şekilde bir yapı ile oluşturulmuş YSA modelinden dokuz adet girdi ile üç adet tahmin alınması hedeflenmektedir. Modeller çok katmanlı- ileri beslemeli ağ yapısı ile oluşturulmuş olup, söz konusu ağ yapıları YSA analizlerinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Modellerin eğitiminde MATLAB öğrenim algoritmaları seçilmektedir. Bu algoritmalar ile farklı YSA modelleri oluşturulmaktadır. En iyi sonuca ulaşan öğrenim algoritması ile bir sonraki adıma geçilmektedir.

Matlab 2021b’de girdi ve çıktı matrisleri oluşturulurken öncelikle, Hatay Amik Ovası’na ait altmış yıllık meteorolojik veriler satırlarında bulunan 12 sütunlu bir veri matrisi oluşturulmuştur. Bu 12 sütunlu veri matrisine ait ilk 9 sütun girdi katmanına ait parametreleri (bağımsız değişken), son 3 sütun ise çıktı katmanına ait parametreleri (bağımlı değişken) temsil etmektedir.

Öncelikle 3 bağımlı değişkenli çözüm sonuçlarını kıyaslamak üzere 3 farklı bağımlı değişken için 3 ayrı çözüm yapılmıştır. 3 bağımlı değişken için 1 çözüm, 1 bağımlı değişkenler için 3 çözüm olmak üzere toplam 4 çözüm yapılmıştır. Girdi matrisleri 4 çözümde de aynı olduğu için 4 çözüm için de 9 sütunlu bir matris tanımlanmıştır.

Input=Data(:,[1 2 3 4 5 6 7 8 9])' (1)

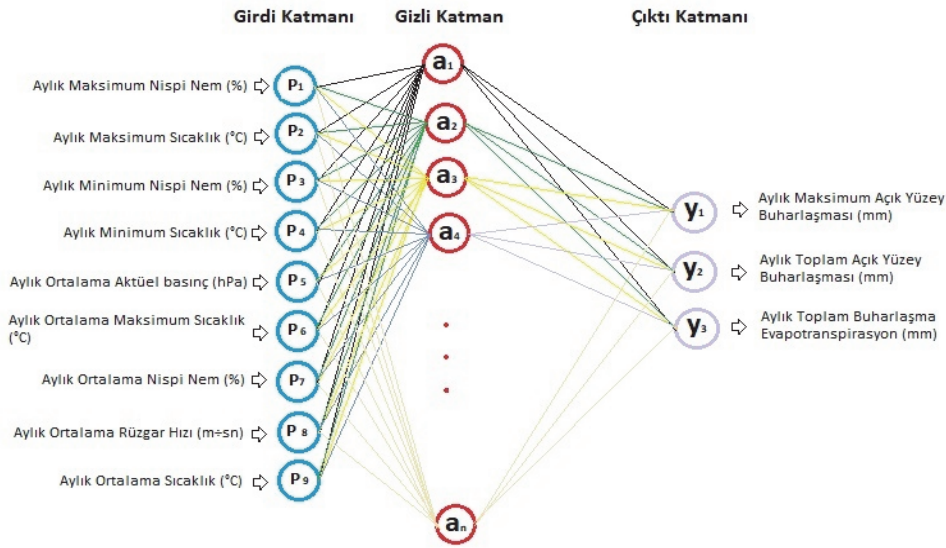
Çıktı matrisleri oluşturulurken 4 çözüm için ayrı ayrı matrisler oluşturulmuştur.

Bağımlı değişkenin “Aylık Maksimum Açık Yüzey Buharlaşması (mm)” seçildiği birinci 1 bağımlı değişkenli çözümde, hedef matrisi 10. Sütunu temsil ettiğinden hedef matrisi 10. Sütuna göre tanımlanmıştır.

Target=Data(:,10)' (2)

Bağımlı değişkenin “Aylık Toplam Açık Yüzey Buharlaşması (mm)” seçildiği ikinci 1 bağımlı değişkenli çözümde, hedef matrisi 11. Sütunu temsil ettiğinden hedef matrisi 11. Sütuna göre tanımlanmıştır.

Target=Data(:,11)' (3)



Şekil 1. Modelde kullanılan ileri beslemeli ağ yapısı – modelin giriş katmanında 9, çıktı katmanında 3 değişken bulunmaktadır

Bağımlı değişkenin “Aylik Toplam Buharlaşma Evapotranspirasyon (mm)” seçildiği üçüncü 1 bağımlı değişkenli çözümde, hedef matrisi 12. Sütunu temsil ettiğinden hedef matrisi 12. Sütuna göre tanımlanmıştır.

$$\text{Target}=\text{Data}(:,12)' \quad (4)$$

3 bağımlı değişkenin aynı çözümde tahmin edilmeye çalışıldığı üç bağımlı değişkenli çözümde, hedef matrisi: “Aylik Maksimum Açık Yüzey Buharlaşması (mm)” olan 10. Sütun, “Aylik Toplam Açık Yüzey Buharlaşması (mm)” 11. Sütun ve “Aylik Toplam Buharlaşma Evapotranspirasyon (mm)” olan 12. Sütunları temsil ettiğinden hedef matrisi 3 sütunlu olarak tanımlanmıştır.

$$\text{Target}=\text{Data}(:,[10 11 12])' \quad (5)$$

YSA modelleri bu girdi ve çıktı matrislerine göre oluşturularak tahminler yapılmıştır.

Üç bağımlı değişkenli tahmin için oluşturulan YSA modeli için en iyi modele ait, ağırlık katsayıları ve bias ağırlık katsayıları kullanılarak YSA'nın matematiksel modeli çok kolay bir şekilde elde edilebilir. Gizli katman ve çıktı katmandaki ilgili ağırlık katsayıları kullanılarak en iyi modele ait Çizelge 1'deki matematiksel fonksiyon elde edilmiştir. İlgili fonksiyon kullanılarak YSA tahminlerine matematiksel işleme de ulaşılabilmektedir.

Burada formül uygulanırken, tahmin edilmeye çalışılan üç adet buharlaşma parametresi; bağımsız değişken olarak kullanılan dokuz adet meteorolojik verinin fonksiyonu olarak formulize edilmiştir.

Bu formülde D fonksiyonu, üç adet buharlaşma parametresini; A, B, C, D, E, F, G, H ve I terimleri meteorolojik parametreleri; T ise tansig teğet sigmoid transfer fonksiyonunu temsil etmektedir. Tansig teğet sigmoid transfer fonksiyonu açık olarak:

$$\text{tansig}(n) = \frac{2}{(1+\exp(-2+n))} - 1 \quad (6)$$

şeklindedir

Çizelge 1'de **A:** Aylik Maksimum Nispi Nem (%), **B:** Aylik Maksimum Sıcaklık (°C), **C:** Aylik Minimum Nispi Nem (%), **D:** Aylik Minimum Sıcaklık (°C), **E:** Aylik Ortalama Aktüel basınç (hPa), **F:** Aylik Ortalama Maksimum Sıcaklık (°C), **G:** Aylik Ortalama Nispi Nem (%), **H:** Aylik Ortalama Rüzgar Hızı (m/s) ve **I:** Aylik Ortalama Sıcaklık (°C) ifadeleridir.

Çizelge 2. YSA modeli BİAS ağırlık katsayıları

$D = \text{hansig}$	hansig	0.165069	-0.004665	-0.179673	-0.700355	-0.103082	-0.005902	-0.234148	0.655273	0.327931	\times	A B C D E F G H I	$+$	1.180611	0.91566	-1.126673	-0.881567	\times	T	0.881567
		0.29939	0.068556	-0.130295	0.00565	0.117641	-0.565301	0.404010	0.574555	0.919314				1.607484	2.528918	-0.843854	1.156645			1.156645
		-0.159093	-0.650263	-0.338333	0.065341	0.931485	0.497327	0.3541	0.060334	0.055735				0.751916	-0.318463	-1.293287	0.119215			0.119215
		0.230967	0.475952	-0.604802	0.11925	-0.697847	-0.6834	0.540340	-0.933711	-0.935597				0.50837	0.021383	-2.447689	-1.450548			-1.450548
		0.04048	-0.314087	0.681828	-0.517095	-0.225495	-0.298218	-0.575087	0.827869	0.426346				-1.542052	-1.109258	0.622587	0.048223			0.048223
		-0.26974	-0.661348	-0.083355	0.310567	2.284322	0.522729	0.173226	1.001684	0.397314				1.788598	0.296465	3.120856	-0.154756			-0.154756
		-0.14807	-0.091492	0.053805	0.509987	0.44435	-0.034013	0.059677	-0.270272	0.063329				-1.806863	1.934258	-0.971923	0.884809			0.884809
		0.096179	-0.247979	-0.216563	0.244997	-0.273525	0.233736	0.985429	0.114678	-0.118441				1.22059	-1.081377	1.64081	0.395249			0.395249
		-0.282442	0.094981	0.374063	-0.414461	-1.107194	0.293564	-0.22241	0.446202	-0.296182				-0.765273	1.09402	1.035304	0.160612			0.160612
		0.146156	-0.103178	0.47722	-0.16579	-0.030043	-0.915866	0.152687	-0.138713	0.285103				-1.426761	-2.668318	-1.579989	0.005512			0.005512
		-0.082818	0.008184	0.330262	-0.099114	0.338185	0.019716	0.108272	-0.030668	0.025476				-1.199518	2.136719	-1.710628	-0.920003			-0.920003
		-0.097534	-0.388668	-0.307639	-0.616523	0.121298	-0.864141	-0.586694	-0.692128	-0.59962				0.47655	0.337659	0.457162	-0.197261			-0.197261
		-0.0802	0.100329	0.132532	-0.254785	-0.484464	0.314033	-0.140251	1.03254	0.372867				2.067758	-0.46776	0.494911	0.338933			0.338933
		0.332204	0.71511	-0.22151	0.536367	-0.350427	0.24012	0.097473	0.174471	-0.214797				0.27037	-0.855547	0.890003	0.548848			0.548848
		-0.148572	-0.063734	-0.118187	0.41346	-0.000962	0.292121	0.060138	0.105048	-0.3345				-0.918699	-1.383366	0.241172	0.888382			0.888382
		-0.220036	0.562265	0.608445	0.380496	-0.687119	-0.607045	0.61138	-0.44112	-0.189248				-1.870636	1.648929	0.837959	-1.096365			-1.096365
		0.788705	0.250228	-0.01339	0.321901	0.867984	-0.295495	0.753171	0.494541	0.809151				-0.607281	1.529186	-1.538598	-1.058773			-1.058773
		-0.35094	-0.142816	0.624016	0.028209	-0.238591	-0.11558	0.033574	0.061183	0.167869				1.133587	0.609037	0.850847	1.217135			1.217135
		-0.717656	0.066205	-0.443867	0.296586	1.21629	0.72482	0.671177	0.630299	0.274389				1.531651	-1.239207	-0.805208	0.435092			0.435092
		0.034306	0.56986	-0.089758	-0.237768	-1.424619	-0.231476	-0.753791	-0.904747	-0.477741				-1.73011	-0.514133	2.083047	-0.197755			-0.197755

Regresyon modeli olarak; linear, interaction, quadratic ve pure-quadratic regresyon modelleri kullanılmıştır.

Linear Çoklu Regresyon eşitliği:

$$Y_i = (\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n) + \varepsilon_i \quad (7)$$

X_i (i = 1, ..., n) bağımsız değişken, 'Yi' bağımlı değişken, ' β ' regresyon katsayıları ve ' ε ' ise hata ifadeleridir.

Interaction Çoklu Regresyon (I-ÇR) eşitliği:

$$Y_{I-ÇR} = (\beta_0 + \beta_1 * x_1 + \beta_2 * x_2 + \beta_3 * x_3 + \beta_4 * x_4 + \beta_5 * x_1 * x_2 + \beta_6 * x_1 * x_3 + \beta_7 * x_1 * x_4 + \beta_8 * x_2 * x_3 + \beta_9 * x_2 * x_4 + \beta_{10} * x_3 * x_4) + \varepsilon_i \quad (8)$$

'x' bağımsız değişken, ' β ' regresyon katsayıları, ve ' ε ' ise hata ifadeleridir.

Quadratic Çoklu Regresyon (Q-ÇR) eşitliği:

$$Y_{Q-ÇR} = (\beta_0 + \beta_1 * x_1 + \beta_2 * x_1^2 + \beta_3 * x_2 + \beta_4 * x_2^2 + \beta_5 * x_1 * x_2 + \beta_6 * x_1 * x_3 + \beta_7 * x_1 * x_4 + \beta_8 * x_2 * x_3 + \beta_9 * x_2 * x_4 + \beta_{10} * x_3 * x_4 + \beta_{11} * x_1^2 + \beta_{12} * x_2^2 + \beta_{13} * x_3^2 + \beta_{14} * x_4^2) + \varepsilon_i \quad (9)$$

'x' bağımsız değişken, ' β ' regresyon katsayıları ve ' ε ' ise hata ifadeleridir.

Pure-Quadratic Çoklu Regresyon (PQ-ÇR) eşitliği:

$$Y_{PQ-ÇR} = (\beta_0 + \beta_1 * x_1 + \beta_2 * x_2 + \beta_3 * x_3 + \beta_4 * x_4 + \beta_5 * x_1^2 + \beta_6 * x_2^2 + \beta_7 * x_3^2 + \beta_8 * x_4^2) + \varepsilon_i \quad (10)$$

denklemleri ile ifade edilmektedir.

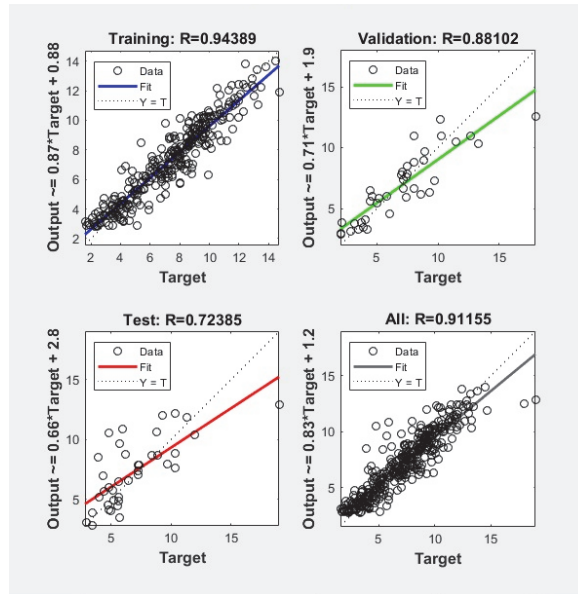
3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Çalışmada YSA modelleri oluşturulurken mevcut altmış yıllık meteorolojik veriler yardımıyla üç farklı buharlaşma parametresi tahmini yapılmaya çalışılmaktadır. Modellerin eğitim, öğrenme ve test oranları (%80-%10-%10) olarak seçilmiştir. %80-%10-%10 oranları literatürde yaygın olarak kullanılan oranlar olup, modelin aşırı öğrenmesini engellemek ve genel performansını değerlendirmek amacıyla eğitim ve test ayrı seçilmiştir. Bu oranların değiştirilmesi durumunda, test verisinin küçük tutulması modelin genelleme kabiliyetini azaltabilirken, eğitim verisinin fazla olması aşırı öğrenmeye neden olabilmektedir. Modellerin gizli katmanlarında farklı nöron sayıları bulunmaktadır. Ayrıca modeller farklı öğrenim algoritmaları ile eğitilmektedir ve farklı transfer fonksiyonlarına sahiptirler.

3.1. Aylık Maksimum Açık Yüzey Buharlaşması (mm) Tahmini

Aylık Maksimum Açık Yüzey Buharlaşması (mm) (A.M.A.Y.B.) tahmini için oluşturulan 1 bağımlı değişkenli yapay sinir ağı ile yapılan tahminler sonucu meteorolojiden alınan gerçek A.M.A.Y.B.

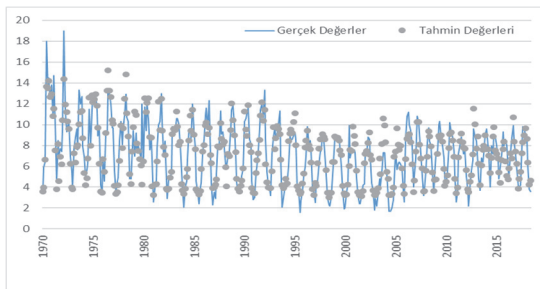
değerlerine %15,57'lik bir ortalama hata oranı ile yaklaşım sağlanmıştır. Gerçek verilere oranla tahminler kıyaslandığında bazı aylarda %0,015'lik bir yaklaşımla neredeyse gerçek değerler tahmin edilmiştir. Tahminler ve gerçek değerler arasındaki ilişkiyi gösteren regresyon değerleri Şekil 2'de görüleceği üzere eğitim için R:0,943, öğrenme için R:0,881, test için 0,723 ve toplam R:0,911'tir. A.M.A.Y.B. tahmini için oluşturulan YSA modelinin yaptığı tahminlerin gerçek A.M.A.Y.B. değerleri ile Şekil 3'te karşılaştırılmıştır. A.M.A.Y.B. tahmini için 4 farklı regresyon metodu ile yapılan çözümde ise Çizelge 2'de görüleceği üzere Lineer Regresyon Modeli: R:0,714, karesel ortalama hata %2,605, yüzdesel ortalama hata %18,682 ve minimum hata %0,056; İnteraction Regresyon Modeli: R:0,777, karesel ortalama hata %2,237, yüzdesel ortalama hata %16,010 ve minimum hata %0,033; Quadratic Regresyon Modeli: R:0,797, karesel ortalama hata %2,101, yüzdesel ortalama hata %15,540 ve minimum hata %0,045; Pure- Quadratic Model ise: R:0,739, karesel ortalama hata %2,436, yüzdesel ortalama hata %17,423 ve minimum hata %0,038 değerleri ile gerçek A.M.A.Y.B. değerlerine yaklaşım sağlamıştır. A.M.A.Y.B. tahmini için regresyon metotları ile yapılan çözümlerde Çizelge 3'deki değerlerde de görüleceği üzere en yaklaşık sonucu Quadratic Regresyon Modeli vermiştir. Gerçek A.M.A.Y.B. değerleri ile Quadratic Regresyona ait tahmin değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4'te verilmiştir. Minimum hatalar nispetinde değerlendirildiğinde ise Quadratic Regresyon Modeli diğer regresyon modellerine göre daha düşük performans göstermiştir.



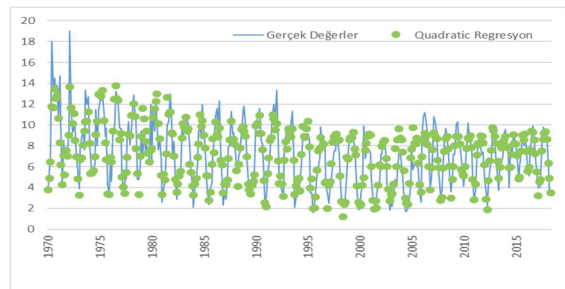
Şekil 2. YSA regresyon grafiği

Çizelge 2. Aylık maksimum açık yüzey buharlaşması (mm) regresyon tahmini performans değerleri

Model	Korelasyon (R)	Karesel ortalama hata	Yüzdesel ortalama hata
Lineer	0,714	2,605	18,682
Interaction	0,777	2,237	16,010
Quadratic	0,797	2,101	15,540
Pure-Quadratic	0,739	2,436	17,423



Şekil 3. Aylık maksimum açık yüzey buharlaşması (mm) YSA tahmini grafiği



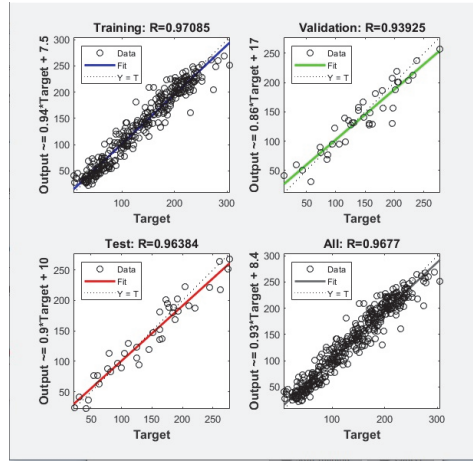
Şekil 4. Aylık maksimum açık yüzey buharlaşması (mm) regresyon tahmini grafiği

3.2. Aylık Toplam Açık Yüze Buharlaşması (mm) Tahmini

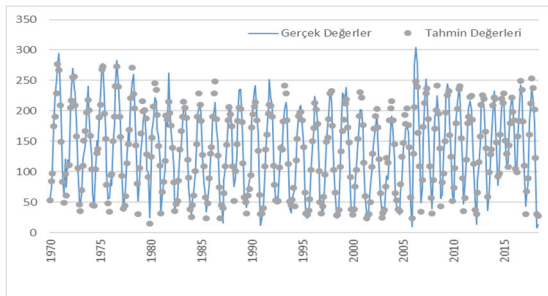
Aylık Toplam Açık Yüze Buharlaşması (mm) (A.T.A.Y.B.) tahmini için oluşturulan 1 bağımlı değişkenli yapay sinir ağı ile yapılan tahminler sonucu meteorolojiden alınan gerçek A.T.A.Y.B. değerlerine %14,03'lük bir ortalama hata oranı ile yaklaşım sağlanmıştır. Gerçek verilere oranla tahminler kıyaslandığında bazı aylarda %0,032'lik bir yaklaşımla gerçek değerlere oldukça yaklaşık tahminler elde edilmiştir. Tahminler ve gerçek değerler arasındaki ilişkiyi gösteren regresyon değerleri Şekil 5'te görüleceği üzere eğitim için R:0,970, öğrenme için R:0,939, test için 0,963 ve toplam R:0,967'tir. A.T.A.Y.B. tahmini için oluşturulan YSA modelinin yaptığı tahminlerin gerçek A.T.A.Y.B. değerleri ile Şekil 6'da karşılaştırılmıştır. A.T.A.Y.B. tahmini için 4 farklı regresyon metodu ile yapılan çözümde ise Çizelge 3'te görüleceği üzere Linear Regresyon Modeli: R:0,908, karesel ortalama hata %461,840, yüzdesel ortalama hata %18,288 ve minimum hata %0,063; İnteraction Regresyon Modeli: R:0,933, karesel ortalama hata %371,948, yüzdesel ortalama hata %14,676 ve minimum hata %0,012; Quadratic Regresyon Modeli: R:0,938, karesel ortalama hata %355,135, yüzdesel ortalama hata %14,511 ve minimum hata %0,065; Pure- Quadratic Model ise: R:0,921, karesel ortalama hata %405,556, yüzdesel ortalama hata %16,586 ve minimum hata %0,024 değerleri ile gerçek A.T.A.Y.B. değerlerine yaklaşım sağlamıştır. A.T.A.Y.B. tahmini için regresyon metotları ile yapılan çözümlerde Çizelge 3'teki değerlerde de görüleceği üzere en yaklaşık sonucu Quadratic Regresyon Modeli vermiştir. Gerçek A.T.A.Y.B. değerleri ile Quadratic Regresyona ait tahmin değerlerinin karşılaştırılması Şekil 7'de verilmiştir. Minimum hatalar nispetinde değerlendirildiğinde ise Quadratic Regresyon Modeli diğer regresyon modellerine göre daha düşük performans göstermiştir.

Çizelge 3. Aylık toplam açık yüze buharlaşması (mm) regresyon tahmini performans değerleri

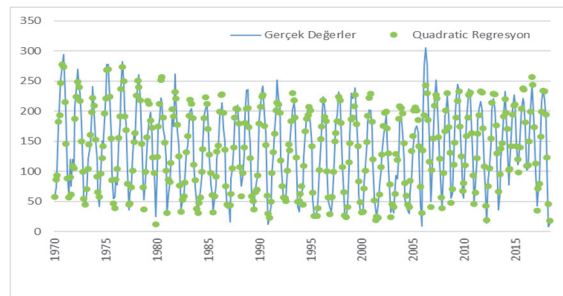
Model	Korelasyon (R)	Karesel ortalama hata	Yüzdesel ortalama hata
Linear	0,908	461,840	18,288
Interaction	0,933	371,948	14,676
Quadratic	0,938	355,135	14,511
Pure-Quadratic	0,921	405,556	16,586



Şekil 5. YSA regresyon grafiği



Şekil 6. Aylık toplam açık yüze buharlaşması (mm) YSA tahmini grafiği



Şekil 7. Aylık toplam açık yüze buharlaşması (mm) regresyon tahmini grafiği

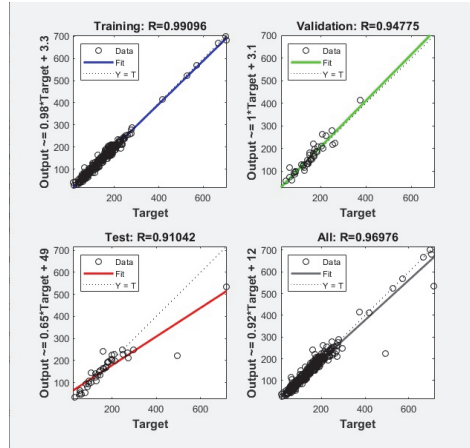
3.3. Aylık Toplam Buharlaşma Evapotranspirasyon (mm) Tahmini

Aylık Toplam Buharlaşma Evapotranspirasyon (mm) (A.T.B.E.) tahmini için oluşturulan 1 bağımlı değişkenli yapay sinir ağı ile yapılan tahminler sonucu meteorolojiden alınan gerçek A.T.B.E. değerlerine %9,08'lük bir ortalama hata oranı ile yaklaşım sağlanmıştır. Gerçek verilere oranla tahminler kıyaslandığında bazı aylarda %0,033'lük bir yaklaşımla gerçek değerlere oldukça yaklaşık tahminler elde edilmiştir. Tahminler ve gerçek değerler arasındaki ilişkiyi gösteren regresyon değerleri Şekil 8'de görüleceği üzere eğitim için R:0,990, öğrenme için R:0,947, test için 0,910 ve toplam R:0,969'dır. A.T.B.E. tahmini için oluşturulan YSA modelinin yaptığı tahminlerin gerçek A.T.B.E. değerleri ile Şekil 9'da karşılaştırılmıştır. A.T.B.E. tahmini için 4 farklı regresyon metodu ile yapılan çözümde ise Çizelge 4'te görüleceği üzere Lineer Regresyon Modeli: R:0,589, karesel ortalama hata %3441,205, yüzdesel ortalama hata %23,868 ve minimum hata %0,044; İnteraction Regresyon Modeli: R:0,792, karesel ortalama hata %1925,463, yüzdesel ortalama hata %21,637 ve minimum hata %0,102; Quadratic Regresyon Modeli: R:0,834, karesel ortalama hata %1579,064, yüzdesel ortalama hata %20,963 ve minimum hata %0,085; Pure- Quadratic Model ise: R:0,771, karesel ortalama hata %1965,437, yüzdesel ortalama hata %21,072 ve minimum hata %0,086 değerleri ile gerçek A.T.B.E. değerlerine yaklaşım sağlamıştır.

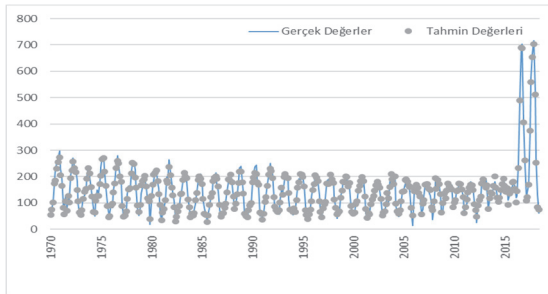
Çizelge 4. Aylık toplam buharlaşma evapotranspirasyon (mm) regresyon tahmini performans bilgileri

Model	Korelasyon (R)	Karesel ortalama hata	Yüzdesel ortalama hata
Linear	0,589	3441,205	23,868
İnteraction	0,792	1925,463	21,637
Quadratic	0,834	1579,064	20,963
Pure-Quadratic	0,771	1965,437	21,072

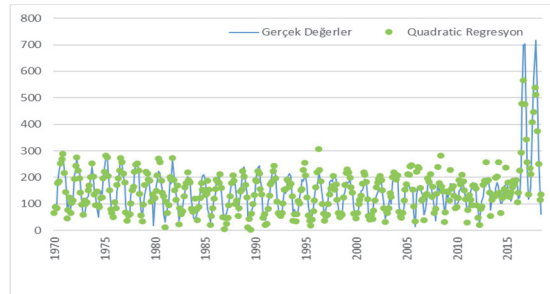
A.T.B.E. tahmini için regresyon metotları ile yapılan çözümlerde Çizelge 4'teki değerlerde de görüleceği üzere en yaklaşık sonucu Quadratic Regresyon Modeli vermiştir. Gerçek A.T.B.E. değerleri ile Quadratic Regresyona ait tahmin değerlerinin karşılaştırılması Şekil 10'da verilmiştir. Minimum hatalar nispetinde değerlendirildiğinde ise Quadratic Regresyon Modeli lineer regresyon modeline göre daha düşük; interaction ve pure quadratic regresyon modellerine göre ise daha iyi performans göstermiştir.



Şekil 8. YSA regresyon grafiği



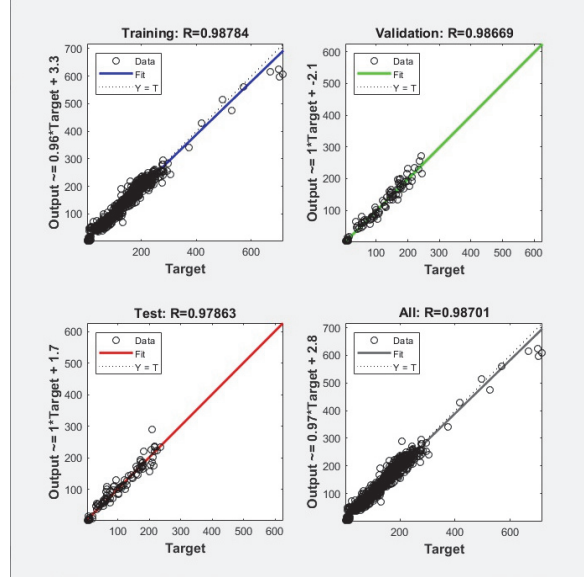
Şekil 9. Aylık toplam buharlaşma evapotranspirasyon (mm) YSA tahmini grafiği



Şekil 10. Aylık toplam buharlaşma evapotranspirasyon (mm) regresyon tahmini grafiği

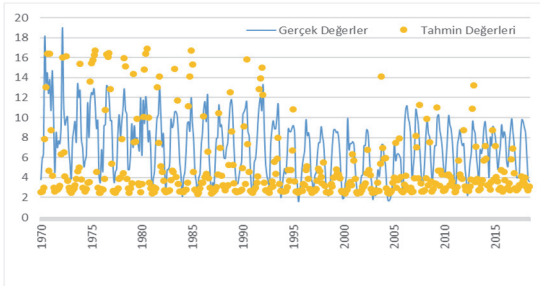
3.4. Üç Bağımlı Değişkenli Tahmin

A.M.A.Y.B., A.T.A.Y.B. ve A.T.B.E'nin birlikte tahmini için yapılan 3 bağımlı değişkenli çözümde Şekil 1'de görüldüğü gibi bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Oluşturulan ağ ile yapılan tahminler sonucu meteorolojiden alınan gerçek A.M.A.Y.B., A.T.A.Y.B. ve A.T.B.E değerlerine %22,94'lük bir ortalama hata oranı ile yaklaşım sağlanmıştır. Gerçek verilere oranla tahminler kıyaslandığında bazı aylarda %0,016'lık bir yaklaşımla neredeyse gerçek değerler tahmin edilmiştir. Tahminler ve gerçek değerler arasındaki ilişkiyi gösteren regresyon değerleri Şekil 11'de görüleceği üzere eğitim için $R:0,987$, öğrenme için $R:0,986$, test için $0,978$ ve toplam $R:0,987$ 'dir.

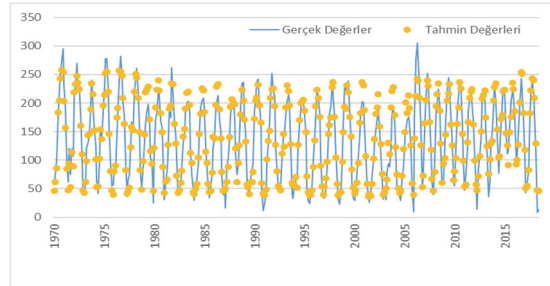


Şekil 11. YSA regresyon grafiği

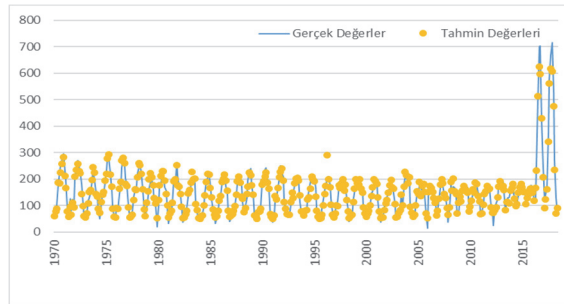
A.M.A.Y.B., A.T.A.Y.B. ve A.T.A.B'nin birlikte tahmini için oluşturulan YSA modelinin yaptığı tahminlerin gerçek A.M.A.Y.B. değerleri ile karşılaştırılması Şekil 12'de, gerçek A.T.A.Y.B. değerleri ile karşılaştırılması Şekil 13'de, gerçek A.T.B.E Şekil 14'te verilmiştir.



Şekil 12. Aylık maksimum açık yüzey buharlaşması (mm) üç bağımlı değişkenle tahmini grafiği



Şekil 13. Aylık toplam açık yüzey buharlaşması (mm) üç bağımlı değişkenle tahmini grafiği



Şekil 14. Aylık toplam buharlaşma evapotranspirasyon (mm) üç bağımlı değişkenle tahmini grafiği

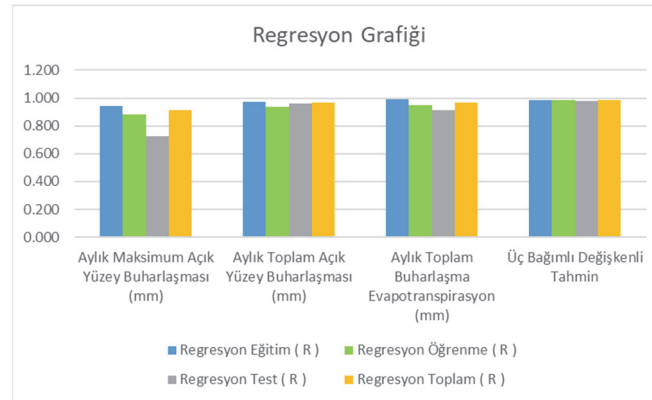
4. SONUÇLAR

Çizelge 5'teki YSA tahmin sonuçları incelendiğinde: Ortalama Hata (%) üzerinden değerlendirme yapıldığında, A.T.B.E. tahmini için oluşturulan modelin %9,08 hata oranı ile en yaklaşık sonucu verdiği görülmektedir. A.M.A.Y.B. tahmini için oluşturulan model %15,57 ve A.T.A.Y.B. tahmini için oluşturulan model %14,03'lük hata oranları ile literatürdeki çalışmalara kıyaslandığında gerçek değerlere ortalama bir yaklaşım sağlamıştır. Ortalama Hata (%) oranında Üç Bağımlı Değişkenli Tahmini için oluşturulan model %22,94 hata oranı göstererek; bir bağımlı değişken ile yapılan tahminlere oranla düşük performans göstermiştir. Ancak literatürdeki çalışmalara bakıldığında %22,94'lük bir hata oranı kabul edilebilir düzeydedir. Öte yandan sonuçlar Minimum Hata Oranı (%) üzerinden incelendiğinde; A.M.A.Y.B. tahmini için oluşturulan model bazı aylarda %0,015'lik bir minimum hata oranı ile gerçek değerlere oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Üç Bağımlı Değişkenli Tahmini için oluşturulan model de %0,016'lık minimum hata oranı ile oldukça iyi performans göstermiştir. A.T.B.E. tahmini için oluşturulan model %0,033'lük, A.T.A.Y.B. tahmini için oluşturulan model ise 0,032'lik minimum hata oranları ile gerçek değerlere yaklaşım sağlamışlardır. Hata oranlarının en yüksek olduğu aylar Temmuz ve Ağustos olup, bu dönemde yüksek sıcaklık değişimleri ve ani buharlaşma artışları nedeniyle modelin performansı düşmüştür.

Çizelge 5. YSA hata oranları ve YSA regresyon değerlerinin karşılaştırılması

	Ortalama hata (%)	Minimum hata (%)	Regresyon eğitim (R)	Regresyon öğrenme (R)	Regresyon test (R)	Regresyon toplam (R)
Tahminler						
Aylık maksimum açık yüzey buharlaşması (mm)	15,570	0,0150	0,943	0,881	0,723	0,911
Aylık toplam açık yüzey buharlaşması (mm)	14,030	0,0320	0,970	0,939	0,963	0,967
Aylık toplam buharlaşma evapotranspirasyon (mm)	9,080	0,0330	0,990	0,947	0,910	0,969
Üç bağımlı değişkenli tahmin	22,940	0,0160	0,987	0,986	0,978	0,987

YSA ile yapılan tahmin sonuçları regresyon değerleri açısından incelendiğinde; Çizelge 5'teki regresyon değerleri ve Şekil 15'teki regresyon grafiğinde görüleceği üzere eğitim için en iyi regresyon değeri 0,990 ile A.T.B.E. tahmini için oluşturulan modele, öğrenme için en iyi regresyon değeri 0,986 ile Üç Bağımlı Değişkenli Tahmin için oluşturulan modele, test için en iyi regresyon değeri 0,978 ile Üç Bağımlı Değişkenli Tahmin için oluşturulan modele aittir. Toplam regresyon değeri olarak bakıldığında R:0,987 ile Üç Bağımlı Değişkenli Tahmin için oluşturulan model en iyi regresyon sonucunu vermiştir. Buharlaşma sonuçlarına ait her bir parametre için ayrı ayrı dört farklı regresyon modeli ile çözüm yapılmıştır.



Şekil 15. YSA regresyon grafiği

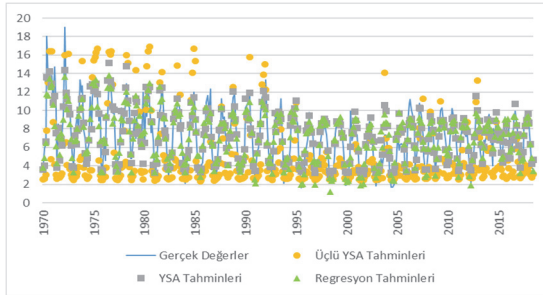
A.M.A.Y.B., A.T.A.Y.B. ve A.T.B.E. olmak üzere üç parametre için de regresyon modelleri içinde en yaklaşık sonuçları Quadratic Regresyon modeli vermiştir. Quadratic Regresyona ait tahmin sonuçları Çizelge 6'da verilmiştir. Çizelge 6'daki Quadratic Regresyona ait sonuçlar kendi içerisinde değerlendirildiğinde: regresyon değerleri açısından incelendiğinde en iyi sonucu 0,938 regresyon değeri ile A.T.A.Y.B. için yapılan tahmin, Karesel Ortalama Hata (%) değerleri açısından incelendiğinde en iyi sonucu %210,100 hata oranı ile A.M.A.Y.B. için yapılan tahmin, Yüzdese Ortalama Hata (%) değerleri açısından incelendiğinde en iyi sonucu %14,511 hata oranı ile A.T.A.Y.B. için yapılan tahmin ve Minimum Hata (%) değerleri açısından incelendiğinde en iyi sonucu %0,045 ile A.M.A.Y.B. için yapılan tahmin

vermiştir. Quadratic Regresyona ait sonuçlar, Üç Bağımlı Değişkenli Tahmin İçin Oluşturulan YSA Modeli sonuçları ile kıyaslandığında ise Yüzdesele Ortalama Hata (%) nispetinde üç bağımlı değişkenli YSA tahminine ait sonuçlar Quadratic Regresyon ait sonuçlara göre daha düşük performans göstermiştir. Regresyon değerleri ve Minimum Hata (%) açısından yapılan değerlendirmede ise Üç Bağımlı Değişkenli Tahmin İçin Oluşturulan YSA Modeli, Quadratic Regresyonla yapılan tahminlere oranla çok daha iyi sonuç vermiştir.

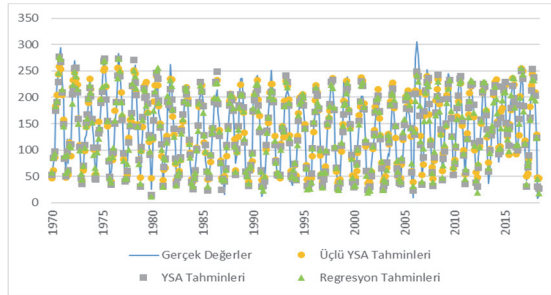
A.M.A.Y.B. için farklı metodlarla yapılan tahminler Şekil 16'da, A.T.A.Y.B. için farklı metodlarla yapılan tahminler Şekil 17'de ve A.T.B.E. için farklı metodlarla yapılan tahminler Şekil 18'de birlikte karşılaştırılmıştır. Üç bağımlı değişkenli tahmin oluşturulan YSA modeli ortalama yüzdesel hatalar (%) bazında ayrı ayrı yapılan YSA çözümleri ve regresyon çözümlerine oranla daha düşük performans göstermiştir ancak üç bağımlı değişkenli tahmin için oluşturulan model, ortalama hatalar (%) bazında ele alındığında, bir bağımlı değişkenler için yapılan çözümlere ve regresyon çözümlerine oranla düşük performans göstermiştir ancak ortalama hata oranları literatürdeki çalışmalarla kıyaslandığında kabul edilebilecek seviyelerdedir.

Çizelge 6. Quadratic regresyona ait sonuçlar

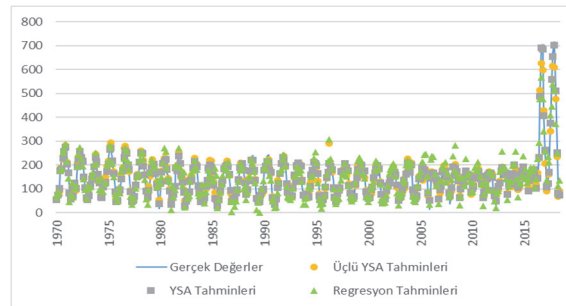
Quadratic regresyon modeline ait sonuçlar		Regresyon	Karesel ortalama hata (%)	Yüzdesele ortalama hata (%)	Minimum hata (%)
Tahminler	Aylık maksimum açık yüzey buharlaşması (mm)	0,797	210,100	15,540	0,045
	Aylık toplam açık yüzey buharlaşması (mm)	0,938	355,135	14,511	0,065
	Aylık toplam buharlaşma evapotranspirasyon (mm)	0,834	1579,064	20,963	0,085



Şekil 16. Aylık maksimum açık yüzey buharlaşması (mm) tahminleri toplu karşılaştırma grafiği



Şekil 17. Aylık toplam açık yüzey buharlaşması (mm) tahminleri toplu karşılaştırma grafiği



Şekil 18. Aylık toplam buharlaşma evapotranspirasyon (mm) tahminleri toplu karşılaştırma grafiği

Regresyon değerleri açısından kıyaslandığında eğitim için R:0,987, öğrenme için R:0,986, test için 0,978 ve toplam R:0,987 değerleri ile bir bağımlı değişkenli çözümlere ve regresyon çözümlerine oranla oldukça iyi seviyede performans göstermiştir. Üç bağımlı değişkenli tahmin için oluşturulan model minimum hatalar (%) nispetinde değerlendirildiğinde de bir bağımlı değişkenli çözümlere ve regresyon çözümlerine oranla daha iyi performans göstermiştir. Oluşturulan tüm modeller ele alındığında, en iyi modele ait performans değerleri eğitim için R:0,987, öğrenme için R:0,986, test için 0,978 ve toplam R:0,987 olan; üç bağımlı değişkenli tahmin için oluşturulan modele aittir. Ayrıca üç bağımlı değişkenli tahmin için oluşturulan modele ait regresyon değerleri kendi arasında da tutarlıdır.

Üç bağımlı değişkenli tahmin için oluşturulan modelin nasıl bir amaç için kullanılabileceğinden, avantajlarından ve dezavantajlarından bahsetmek gerekirse, bu model, tarımsal sulama yönetimi, su kaynakları planlaması ve taşkın kontrol sistemlerinde karar destek aracı olarak kullanılabilir. Ayrıca:

- Aynı parametreye ait değişik sonuçları, YSA ağırlık ve bias katsayıları değişmeden aynı transfer fonksiyonları ve aynı model yapısı ile tek çözümde kendi içinde de kıyaslama imkanı vermektedir. Örneğin yine buharlaştırma ele alındığında, birinci bağımlı değişken olarak gerçek değerler, ikinci bağımlı değişken olarak ampirik yöntemlere ait sonuçlar, üçüncü bağımlı değişken olarak ise geleceğe yönelik tahmin sonuçları girildiğinde üç sonuca da aynı işlemlerle yaklaşım sağlanacağından; değerleri kendi arasında kıyaslamak ya da sonuçları değerlendirmek daha kolay olacaktır.
- Çözüm süresi kısalmakta ve veri sonuç yoğunluğu azalmaktadır.
- YSA regresyon değerleri ve minimum hata (%) değerleri olarak çok iyi sonuçlar alınmasına rağmen ortalama yüzdesel hata (%) değerlerindeki nispi performans düşüklüğü dezavantaj olarak nitelendirilebilir.

Öte yandan Bu model, yarı kurak ve kurak bölgelerde benzer iklim koşullarında uygulanabilir. Ancak, bölgesel faktörler göz önüne alınarak tekrar eğitilmesi önerilmektedir.

5. KAYNAKLAR

1. Taşar, B., Üneş, F., Demirci, M. ve Ziya Kaya, Y. (2018). Yapay sinir ağları yöntemi kullanılarak buharlaştırma miktarı tahmini. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 9, 543-551.
2. Terzi, Ö. ve Keskin, M.E. (2005). Yapay sinir ağları yaklaşımı kullanılarak günlük tava buharlaştırma tahmini. *İMO Teknik Dergi*, 3683-3693.
3. Doğan, E., Işık, S. ve Sandalcı, M. (2007). Günlük buharlaşmanın yapay sinir ağları kullanarak tahmin edilmesi. *İMO Teknik Dergi*, 4119-4131.
4. Dindar, K.K. (2010). Yapay sinir ağları yaklaşımı ile Tahtaköprü barajındaki aylık buharlaştırma miktarının tahmini. *Yüksek Lisans Tezi*, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.
5. Kişi, Ö. ve Afşar, S. (2010). Yapay sinir ağı ve bulanık-yapay sinir ağı yöntemleri kullanılarak tava buharlaştırma tahmini. *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi*, 3(1), 45-51.
6. Üneş, F., Varçin, H. ve Dindar, K.K. (2011). Yapay sinir ağları yaklaşımı ile Tahtaköprü Barajındaki aylık buharlaştırma tahmini. *E-Journal Of New World Sciences Academy Engineering Sciences*, 6(1), 114-125.
7. Yıldız, F.E. ve Gürer, İ. (2014). Sultansazlığı sulak alanı için buharlaştırma yöntemlerinin karşılaştırılması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(3), 247-254.
8. Gümüş, V., Şimşek, O., Soydan, N.G., Aksöz, M.S. ve Yenigün, K. (2015). Adana istasyonunda buharlaşmanın farklı yapay zekâ yöntemleri ile tahmini. *VIII. Ulusal Hidroloji Kongresi*, 309-318.
9. Kaya, Y.Z., Mamak, M. ve Üneş, F. (2016). Evapotranspiration prediction using M5t data mining method. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 3(12), 225-229.
10. Üneş, F., Kaya, Y.Z., Mamak, M. ve Demirci, M. (2017). Evapotranspiration estimation using support vector machines and hargreaves-samani equation for St. Johns, Fl, Usa. *10th International Conference On Environmental Engineering, ICEE 2017*.
11. Mamak, M., Üneş, F., Kaya, Y.Z. ve Demirci, M. (2017). Evapotranspiration prediction using adaptive neuro-fuzzy inference system and penman Fao 56 Equation for St. Johns, Fl, Usa. *10th International Conference On Environmental Engineering, ICEE 2017*.
12. Gümüş, V., Yenigün, K., Toprak, Z. F. ve Oruç Baçi, N. (2018). Şanlıurfa ve Diyarbakır istasyonlarında sıcaklık tabanlı buharlaştırma tahmininde YSA, ANFIS ve GEP yöntemlerinin karşılaştırılması. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 9, 553-562.
13. Özel, A. (2018). Meteorolojik verileri kullanarak aylık tava buharlaşmasını tahmin etmek için yapay zeka metodlarının uygulanması. *Yüksek Lisans Tezi*, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.
14. Üneş, F., Taşar, B., Kaya, Y.Z. ve Demirci, M. (2018). The evaluation and comparison of daily reference evapotranspiration with ann and empirical methods. *Natural And Engineering Sciences*, 3(3), 54-64.
15. Özel, A. Büyükyıldız, M. (2019). Aylık buharlaştırma tahmininde yapay zeka yöntemlerinin kullanılabilirliği. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(1), 244-254.

16. Doğan, A. (2019). Namazgâh barajına ait buharlaşma miktarının yapay sinir ağı ile tahmin edilmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
17. Yıldırım, D., Cemek, B. ve Küçüktopçu, E. (2019). Bulanık yapay sinir ağları ve çok katmanlı yapay sinir ağları ile günlük buharlaşma tahmini. *Toprak Su Dergisi*, 24-31.
18. Özdülkar, K., Üneş, F., Demirci, M. ve Kaya, Y.Z. (2019). Günlük buharlaşma miktarının bulanık mantık yöntemleri kullanılarak bölgesel olarak modellenmesi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2(1), 23-29.
19. Üneş, F., Kaya, Y.Z. ve Mamak, M. (2020). Daily reference evapotranspiration prediction based on climatic conditions applying different data mining techniques and empirical equations. *Theoretical And Applied Climatology*, 141(1-2), 763-773.
20. Doğan, S. (2020). Günlük buharlaşma miktarının yapay sinir ağları metotları ve klasik yöntemlerle tahmini. *Yüksek Lisans Tezi*, İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.
21. Üneş, F. ve Kaya, Y.Z. (2021). Evaluation of long-term air temperature, precipitation and flow rate parameters trend change using different approaches: A case study of Amik Plain, Hatay. *Theoretical And Applied Climatology*, 146(3-4), 1157-1173.
22. Gümüş, V., Yeşiltaş, Y. ve Şimşek, O. (2021). Yapay zekâ yöntemleri ile Adıyaman ve Diyarbakır istasyonlarının aylık tava buharlaşmalarının tahmin edilmesi. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 10(2), 112-122.
23. Özdülkar, K. (2021). Günlük referans buharlaşma miktarının yapay zeka yöntemleri ve ampirik denklemler ile tahmini. *Yüksek Lisans Tezi*, İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.
24. Tütüncü, Ö. (2022). Yapay sinir ağları (YSA) modeli ile su yüzeyinden buharlaşmanın tahmini atatürk barajı örneği. *Yüksek Lisans Tezi*, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik.
25. Katipoğlu, O.M. ve Acar, R. (2021). Eksik sıcaklık verilerinin yapay sinir ağları (YSA) ile tahmin edilmesi. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 12(2), 431-438
26. Gençoğlu, C. ve Badem, H. (2024). Yapay sinir ağları kullanarak iklim parametrelerinden Pan buharlaşmanın tahmin edilmesi. *AgriTR Science*, 6(2), 122-128.
27. Göçmen, S. (2018). Gezgin satıcı problemleri baz alınarak multimodal taşımacılık güzergâhlarının optimizasyonu ve akıllı ulaşım sistemlerine entegrasyonu. *Yüksek Lisans Tezi*, İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.
28. Cansız, Ö.F. (2018). By using logarithmic regression and artificial neural network to improve prediction model of dead number resulted from road traffic accidents in Turkey. *Karaelmas Science And Engineering Journal*, 8(2), 446-453.



Türkiye'nin Büyük Şehirlerinde Yaz Aylarında Cam Filmi Kullanımı ile Isı Kazancı Kestirimi ve Maliyet Analizi

Erdem Onur ÖZYURT ^{1,a}, Mehmet Gökhan GÖKÇEN ^{1,b}, Mehmet İPEKOĞLU ^{1,c}

¹Türk-Alman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul

^aORCID: 0000-0002-1098-2314; ^bORCID: 0000-0001-5861-3377; ^cORCID: 0000-0002-0019-3346

Makale Bilgileri

Geliş : 01.06.2024

Kabul : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665449

Sorumlu Yazar

Erdem Onur ÖZYURT

ozyurt@tau.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Cam filmi,

Maliyet analizi

Enerji verimliliği

Güneş ısı kazancı

Karbon emisyonu

Atf şekli: ÖZYURT, E.O., GÖKÇEN, M.G., İPEKOĞLU, M., (2025). Türkiye'nin Büyük Şehirlerinde Yaz Aylarında Cam Filmi Kullanımı ile Isı Kazancı Kestirimi ve Maliyet Analizi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(1), 17-31.

ÖZ

Küresel ısınma ile bağlantılı olarak dünya çapında birçok felaket meydana gelmektedir. Sera gazlarının emisyon seviyelerini azaltmanın yollarını bulmak için birçok çalışma yürütülmektedir. Fosil yakıt tüketiminin azaltılması emisyonları azaltmak için kullanılan en yaygın yöntemdir. Bu çalışmada belirli cam filmi özelliklerine sahip bir model binada sağlanacak ısı kazancının kestirimi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, saydam ve renkli cam üzerine kaplanmış üç film tipi için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Isı kazancı kestirimi, şehir, cam, bina ve nem özellikleri dikkate alınarak yaz günleri için uyarlamalı olarak yapılmıştır. Filmsiz saydam cam için elde edilen son oda sıcaklığı referans olarak alınmış ve diğer yedi tipte cam için kestirim bu referansa göre yapılmıştır. Örnek binanın konumu, sıcaklığı ve cephesi gibi özellikler dikkate alınarak elektrik tüketimi, karbon emisyonu ve fiyat açısından maliyet analizi yapılmıştır.

Heat Gain Estimation with Window Film Application in Some Major Cities of Türkiye during Summer and Related Cost Estimation

Article Info

Received : 01.06.2024

Accepted : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665449

Corresponding Author

Erdem Onur ÖZYURT

ozyurt@tau.edu.tr

Keywords

Window film

Cost analysis

Energy efficiency

Solar heat gain

Carbon emission

How to cite: ÖZYURT, E.O., GÖKÇEN, M.G., İPEKOĞLU, M., (2025). Heat Gain Estimation with Window Film Application in Some Major Cities of Türkiye during Summer and Related Cost Estimation. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(1), 17-31.

ABSTRACT

Many disasters occur around the world in connection with global warming. Many studies are conducted to find ways of decreasing levels of emissions of greenhouse gases. Reducing consumption of fossil fuels is the most common method used to decrease emissions. This study focusses on estimation of heat gain in a model room with given characteristics of window filming. The results are given comparatively for eight types of windows including clear and tinted windows and additionally three types of filming coated on both types. Heat gain is estimated for summer days adaptively by using the models taking into account the location of the city, the position of windows, the building volume and moisture. The heat gain and final room temperature for clear window is taken as a reference and other seven calculations are observed in terms of differences between heat gains in order to evaluate and compare their effectiveness. Cost analysis is performed in terms of electric consumption, carbon emission and price for characteristics including location, temperature and facade of the sample room.

1. GİRİŞ

Sanayi devrimi sonucunda on dokuzuncu yüzyılda başlayan ekonomik büyüme yirminci yüzyılda da devam etmiş ve buna önemli bir nüfus artışı eşlik etmiştir. Hızlı nüfus artışı, yoğun kentleşme ve yaşam kalitesindeki iyileşme enerji tüketimini önemli ölçüde artırmıştır. Enerji kullanımındaki bu artış, çevresel sorunlara ve buna bağlı maliyetlere yol açmıştır. Yüksek enerji tüketiminin çevre üzerindeki olumsuz etkileri, küresel ekonomiyi ve yaşam kalitesini gözle görülür bir şekilde etkilemeye başlayana kadar büyük ölçüde göz ardı edilmiştir. Bununla birlikte, sera etkisine katkıda bulunan atık gazlar, fosil yakıtların artan kullanımıyla daha da şiddetlenmiş, şehirlerde hava, su ve toprak kirliliğine ve küresel iklim değişikliklerine yol açmıştır [1].

Pencereler, yeterli iç aydınlatma ve iç ve dış mekanlar arasında görsel bir bağlantı sağlamak için tasarlanmıştır. Saydam malzemelerden yapılan pencereler, ısı kaybına karşı en hassas bileşenlerdir. Çoğu kış gününün bulutlu olduğu göz önüne alındığında, binalar genellikle kış aylarında net ısı kaybı yaşarlar. Yaz aylarındaysa tam tersine ısı kazancı gerçekleşir [2]. Binalar enerji tasarrufu ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasında çok önemli bir rol oynamaktadır ve pencereler ısı kayıplarının yaklaşık %60'ını oluşturmaktadır. Sonuç olarak, pencereler binalardaki enerji tüketimini azaltmayı amaçlayan araştırmalarda kritik bir odak noktasıdır [3]. Pencereler, estetik görünüm, iklimlendirme, pasif güneş enerjisi kazanımı, aydınlatma ve acil durumlarda çıkış hizmeti gibi özellikleri nedeniyle bir binanın önemli bileşenleridir. Bu nedenle, pencereler zaman içinde bina cephelerinde daha büyük alan kaplayacak şekilde kullanılmaya başlanmıştır [4]. Pencereler, diğer yapı malzemelerine kıyasla yüksek U değerleri nedeniyle binalardaki ısı kaybının önemli bir kısmını oluşturmakta ve daha yüksek maliyet ve daha fazla sera gazı emisyonuna yol açmaktadır. Bu nedenle, pencereler binalardaki ısı kaybından kaynaklanan sera gazı emisyonunun azaltılmasında da etkili bir çözüm olarak kabul edilmektedir. Enerji maliyetleri, pencerelerin ısı yalıtım performansının iyileştirilmesiyle yüksek enerji tasarrufu sağlayacak şekilde azaltılabilir. Bina standartları 2000'li yıllardan itibaren bu kapsamda revize edilmiştir. Bu standartlar, uygun inşaat malzemelerinin kullanımıyla enerji verimliliğini artırarak binaların ısıtılması veya soğutulması için maksimum enerji ihtiyacının azaltılmasına yardımcı olmuştur. Geleneksel pencereler kullanarak üstün termal standartlara uymak mümkün değildir. Mevcut pencere teknolojisi, yüksek enerji tüketimine yol açtığı için karbon emisyonunun azaltılmasına izin vermemektedir [5].

Bir binanın tüm bileşenleri, pencereler de dahil olmak üzere entegre bir sistemin parçası olarak işlev görür. Enerji tasarruflu pencereler, kış veya yaz aylarında optimum performans için özel optik ve termofiziksel özelliklerle tasarlanıp sonuçta enerji tüketiminin azaltılmasına katkıda bulunurlar [6]. Bir binanın termal verimliliği, pencerelerin boyutuna ve özelliklerine bağlıdır [7]. Bir binanın ısı kaybının yaklaşık %60'ı pencerelerden gerçekleşirken, soğutma yükünün %40'ı güneş ışınımından ve pencerelerden ısı kazanımından kaynaklanmaktadır [8]. Cam filmleri, pencerelerden ısı kazanımını en aza indirmek için uygun maliyetli ve etkili bir çözümdür. Bu ince filmler, güneş ısıyı yansıtma üzere tasarlanmış termal özelliklere sahip metalik-polyester katmanlardan oluşur. Bunun yanında, UV ışınlarının bina içine girmesini engelleyebilir ve bina içindeki dekorun güneş radyasyonunun zararlı etkilerinden korunmasını sağlayabilir [9]. Filmin metalik bileşeni güneş ısıyı yansıtırken, polyester bileşeni güneş ışığının metalik katmandan geçmesine izin verir. Pencerelerin dış yüzeyine uygulanan filmler, dış ortam koşullarına dayanabilecek malzemelere duyulan ihtiyaç nedeniyle daha pahalıdır [10].

2. LİTERATÜR TARAMASI

Cam filmlerinin uygulanması hem nemli hem de kuru bölgelerde performans bakımından incelenmiştir. Bir çalışmada saydam camların enerji tasarrufu açısından renkli camlardan daha iyi performans gösterdiği ortaya koyulmuştur [11]. Bir başka çalışmada ise dış ve iç cam filmlerinin sırasıyla %44 ve %22 oranında enerji tasarrufu sağlayabileceği belirlenmiştir [12]. Literatürde cam filmlerinin yaz aylarında enerji tasarrufu için etkili olmalarına rağmen görece daha sıcak iklimlerde kış aylarında enerji kullanımının artmasına neden olabileceği belirtilmektedir [13]. Yapılan çalışmalarda akıllı pencere teknolojilerinin etkili ancak genellikle maliyetli olduğu gösterilmiştir [14]. Çin'de beş farklı iklim koşulu analiz edilmiş ve opak esnek pencere panjurlarının enerji tasarrufu için en etkili çözüm olduğu belirtilmiştir [15]. Pencere boyutu, en-boy oranı ve konumunun ısı kaybı üzerindeki etkisi de incelenmiş ve soğuk iklimlerde pencere eğiminin ve boyutunun etkileri araştırılmıştır [16]. Bir çalışmada cam filmleriyle birlikte çift camlı pencerelerin enerji kullanımını artırdığı bildirilirken [17], simülasyonların kullanıldığı bir başka çalışmada sıcak ve diğer

iklimlerde soğutma yükünde %17 ila %47 oranında bir azalma olduğunu gösterilmiştir [18]. İnsan alışkanlıkları binaların ısı kaybını önemli ölçüde etkilemektedir ve bu durum otomatik iklimlendirme sistemlerinin insan davranışlarının enerji tasarrufu üzerindeki olumsuz etkisini azaltabileceğini düşündürmektedir [7]. Binalarda enerji tüketimini azaltmak için, yeni pencere teknolojileri düşük U değeri, uygun bir g değeri, yüksek hava geçirmezlik ve yüksek ışık geçirgenliğine sahip olmalıdır. Enerji endeksi hesaplanırken termal geçirgenlik, güneş ısı kazanç katsayısı ve hava geçirmezlik faktörleri dikkate alınmaktadır [7]. Başka bir çalışmada pencerelerin performans analizine görünür geçirgenlik ve salınım katsayısı dahil edilmiştir [19].

Bu çalışma, oda ve pencere boyutları verilen bir binanın pencere yoluyla alınan ısı kazancının kestiriminin yapılmasını kapsamaktadır. Sonuçları ısı kazancı verimliliği açısından karşılaştırılarak maliyet analizi yapıldıktan sonra en verimli cam filminin tespit edilmesi amaçlanmıştır.

3. YÖNTEM

Yöntem, Kirchoff radyasyon yasasına dayandırılmıştır. Verilen radyasyon yasası yinelemeli bir şekilde uygulanmıştır [20]. Yinelemeli adımlar, önerilen Boles prosedürü [21] takip edilerek Eşitlik 1'de verilmiştir.

$$\dot{Q}_{kazanç} = SHGC \cdot SC \cdot A_{cam} \cdot \dot{q}_{anlık} \quad (1)$$

Burada SHGC, SC ve A_{cam} sırasıyla güneş ısı kazanç katsayısını, gölgeleme katsayısını ve cam yüzey alanını ifade etmektedir. $\dot{Q}_{kazanç}$ ve Eşitlik 2'de verilen $\dot{q}_{anlık}$ ise W cinsinden net güneş ısı kazancını ve W/m^2 cinsinden anlık güneş ısı akışını ifade etmektedir.

$$\dot{q}_{anlık} = \alpha_s G_{solar} + \epsilon \sigma (T_{Hava}^4 - T_s^4) \quad (2)$$

Burada α_s , G_{solar} , ϵ ve σ sırasıyla yüzey güneş soğurma katsayısını, yüzeye gelen anlık toplam güneş enerjisini, yayılma katsayısını ve Stefan-Boltzmann katsayısını ifade ederken T_{Hava} ve T_s sıcak koşullarda etkin hava sıcaklığını ve yineleme adımlarının başındaki yüzey sıcaklığını ifade etmektedir.

$$Q_{kazanç,1sa} = \dot{Q}_{kazanç} \left(\frac{kJ}{s} \right) \times 3600(s) \quad (3)$$

Eşitlik 3'te verilen $Q_{kazanç,1sa}$ camdan geçen 1 saatlik toplam ısı kazancını ifade etmektedir.

$$T_{son} = f(Q_{kazanç}, V_{oda}, m_{kuru\ hava}, \rho_{hava}) \quad (4)$$

Eşitlik 4'te T_{son} odanın son sıcaklığını, $f(\cdot)$ ise odadaki hava yoğunluğunu yinelemeli olarak güncelleyen ve nem etkisini hesaba alarak T_{son} kestirimini yapan fonksiyondur. Bu çalışmada önerilen yöntemde $G_{kazanç}$ ve T_{son} kestirimleri uyarlanabilir bir şekilde yinelemeli olarak entegre edilmiştir.

Bu çalışmada, cam filmi tipleri için ilgili çalışmada kullanılan katsayı değerleri kullanılmıştır [20]. Bunlar arasında saydam camlar ve renkli camlar, ayrıca A, B ve C tipinde filmlerle kaplanmış her iki tipte camı içermektedir. Bu çalışma, G_{solar} ve T_{son} kestirimi için yeni bir yaklaşım önererek kestirim amacıyla yinelemeli bir yöntem yapısı geliştirilmiştir. Kestirim için gerekli hesaplamalara ait uyarlanabilir yapı ilerleyen bölümlerde ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Cam filmi özellikleri gölgeleme katsayısı (SC), güneş ısı kazancı katsayısı (SHGC) ve yüzey güneş soğurma katsayısı (α_s) parametrelerine bağlı olup bu parametreler Çizelge 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan cam ve film SC, SHGC ve α_s katsayıları

Özellik	Saydam	Renkli	Filmler			Filmler		
			A	B	C	A	B	C
Film	-	-	A	B	C	A	B	C
SC	0,94	0,69	0,47	0,47	0,24	0,43	0,43	0,31
SHGC	0,82	0,60	0,41	0,41	0,21	0,37	0,38	0,27
α_s	0,88	0,50	0,39	0,36	0,09	0,23	0,21	0,05

3.1. Eğimli bir Yüzeyde Saatlik Güneş Radyasyon Miktarının Hesaplanması

Eşitlik 3'te verilen $Q_{kazanç,1sa}$, 1 saat içerisinde yüzeye gelen toplam güneş enerjisini temsil etmektedir. Eğimli yüzeyler üzerindeki saatlik küresel güneş radyasyonu kestirimi başka bir çalışmada verilen yöntemle göre yapılmıştır [22].

Deklasyon, $23,45^\circ$ kuzey ve $23,45^\circ$ güney arasında dalgalanan, güneşten dünyanın ekvatoruna olan açısal mesafedir. Bu dalgalanma, dünyanın güneşe göre eğik dönüş ekseninden kaynaklanmaktadır. δ ile gösterilen deklasyon açısı Eşitlik 5'te gösterilen şekilde hesaplanmaktadır [23].

$$\delta = (0.006918 - 0.399912\cos\Gamma + 0.070257\sin\Gamma - 0.006758\cos2\Gamma + 0.000907\sin2\Gamma - 0.002697\cos3\Gamma + 0.00148\sin3\Gamma) \quad (5)$$

Burada Γ gün açısına karşılık gelmektedir, n yılın günü olup Eşitlik 6'da verilen şekilde hesaplanır.

$$\Gamma = 2\pi \left(\frac{n-1}{365} \right) \quad (6)$$

Eşitlik 7'de verilen saat açısı, ω ile gösterilir ve dünyanın kutup eksenini etrafındaki dönüşünü tanımlar. Gözlemcinin meridyeni ile düzlemi güneş ışınlarına dik açıyla bakan meridyen arasındaki açısal mesafedir ve öğle vakti sıfır derecedir.

$$\omega = 15 \cdot (12 - ST) \quad (7)$$

$$ST = LT + \frac{ET}{60} + \frac{4}{60} (L_s - L_L) \quad (8)$$

Burada LT , L_s ve L_L sırasıyla yerel standart zaman, standart meridyen ve paralel değerleri olup Eşitlik 8'de ST sembolüyle gösterilen yerel zaman hesaplaması için kullanılırlar. ET zaman denklemi olup hesaplaması Eşitlik 9'da ve B açısının hesaplaması Eşitlik 10'da verilmiştir.

$$ET = 9.87\sin2B - 7.53\cos B - 1.5\cos B \quad (9)$$

$$B = 360 \cdot \frac{n-81}{365} \quad (10)$$

Azimut açısı γ , güneş radyasyonu projeksiyonu ile güney kutbu arasındaki açısal mesafe olarak tanımlanır. Enlem ϕ , dünyanın ekvatorunun kuzeyine veya güneyine göre konumudur.

Eşitlik 11, eğimli bir yüzey üzerindeki saatlik küresel güneş radyasyonunu hesaplamak için kullanılır ve I_β olarak gösterilir.

$$I_\beta = I_{d\beta} + I_{b\beta} + I_r \quad (11)$$

$I_{d\beta}$, $I_{b\beta}$ ve I_r sırasıyla yayılım radyasyonunu, ışın radyasyonunu ve yansıyan radyasyonu temsil eder, β ise yüzeyin eğim açısıdır [22].

Eşitlik 12'de görüldüğü üzere $I_{d\beta}$ hesaplanmasında eğimli bir yüzey üzerindeki güneş yayılım radyasyonunu belirlemek için geliştirilen izotropik bir model kullanılmıştır [24].

$$I_{d\beta} = \left(\frac{3+\cos2\beta}{4} \right) \times I_d \quad (12)$$

Burada I_d eğimli yüzeyde saatlik yayılım radyasyonunu ifade etmektedir ve hesaplanmasında parametrik bir model kullanılır [25]. Eşitlik 13'te gösterilen şekilde hesaplanır.

$$I_d = C \cdot I_{bN} \quad (13)$$

$$I_{bN} = A \cdot \exp\left\{-\frac{B}{\cos\theta_Z}\right\} \quad (14)$$

$$\theta_Z = \cos^{-1}(\sin\delta \sin\phi + \cos\delta \cos\phi \cos\omega) \quad (15)$$

Eşitlik 14'te verilen I_{bN} normal güneş yayılım radyasyonu olup Eşitlik 15'te verilen θ_Z zenit açısıdır. A, B ve C ASHRAE algoritmasından alınan sabit değerlerdir [26]. Sabit A, B ve C değerleri yılın 12 ayı için Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. ASHRAE modelinde hesaplanan A, B ve C sabit değerleri

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
A	1230	1215	1186	1136	1104	1088	1085	1107	1152	1193	1221	1234
B	0,142	0,144	0,156	0,180	0,196	0,205	0,207	0,201	0,177	0,160	0,149	0,142
C	0,058	0,060	0,071	0,097	0,121	0,134	0,136	0,122	0,092	0,073	0,063	0,057

Öte yandan, eğimli bir yüzeye gelen doğrudan ışın radyasyonu Eşitlik 11'de $I_{b\beta}$ olarak gösterilmiştir. Eşitlik 16'da gösterildiği gibi hesaplanır [27].

$$I_{b\beta} = r_b \cdot I_b \quad (16)$$

Burada r_b eğimli yüzeyde alınan saatlik radyasyon miktarının eğimsiz yüzeyde alınan miktara oranını ifade eder. Hesaplaması Eşitlik 17'de verilmiştir. Eşitlik 18'deyse ekvatora bakan yüzeye geliş açısı verilmiştir.

$$r_b = \frac{\cos\theta_0}{\cos\theta_Z} \quad (17)$$

$$\cos\theta_0 = \sin\delta \sin(\phi - \beta) + \cos\delta \cos(\phi - \beta) \cos\omega \quad (18)$$

Eşitlik 11'de I_r ile gösterilen eğimli yüzeyden yansıyan radyasyon Eşitlik 19 ile hesaplanır.

$$I_r = (I_{d\beta} + I_{b\beta}) \cdot \rho \cdot \left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right) \quad (19)$$

Burada zemin yansıtma özelliği ρ genellikle 0,2 değerine sabitlenir [25].

3.2. Yinelemeli Oda Sıcaklığı Hesaplama

Kütle, ısı kapasitesi ve ilk sıcaklık gibi özellikleri verilen bir nesnenin veya maddenin son sıcaklığı, Eşitlik 20'de verilen termal enerji değişimi formülü kullanılarak kolayca hesaplanabilir.

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (20)$$

Burada Q ısı enerjisi değişimi olup m , C_p ve ΔT sırasıyla kütle, özısı kapasitesi ve sıcaklık değişimini temsil eder.

Ancak, sıcaklık değişimine bağlı olarak havanın yoğunluğunun değiştiği göz önüne alındığında, sıcaklığın değiştiği bir ısı iletimi sırasında odadaki havanın kütlesi sabit kalmaz. Sıcaklık değiştiğinde, sadece kuru hava ve nemli havanın yoğunluğu değil, aynı zamanda kuru hava ve nemli hava arasındaki oran da değişecektir. Bu nedenle, uyarlanabilir bir hesaplama prosedürü odadaki son sıcaklığının kestiriminin daha doğru yapılmasına yardımcı olacaktır. Son sıcaklık kullanılarak, odanın istenen sıcaklığa soğutulması için gereken elektrik enerjisi miktarı da daha doğru bir şekilde kestirilebilir. Eşitlik 20'ye T_{son} eklendiğinde Eşitlik 21 elde edilir.

$$T_{son} = \frac{Q_{kazanç}}{m_{hava} \cdot C_p} + T_{ilk} \quad (21)$$

$$m_{hava} = V_{oda} \cdot \rho_{hava} \quad (22)$$

Eşitlik 22'de m_{hava} , V_{oda} ve ρ_{hava} sırasıyla odadaki havanın kütlesi, odanın hacmi ve oda içindeki havanın yoğunluğudur.

Hava yoğunluğu kuru hava ve nem bileşenlerinden elde edilir. Bu durumda hava yoğunluğunu hesaplamak için sıcaklık değişikliğine bağlı olarak yinelemeli bir yöntem kullanılmıştır. Hava yoğunluğu Eşitlik 23'te verilen şekilde hesaplanır.

$$\rho_{hava} = \frac{P_d}{R_d \cdot T_{ilk}} + \frac{P_v}{R_v \cdot T_{ilk}} \quad (23)$$

Burada P_d ve P_v sırasıyla Pascal cinsinden kuru hava basıncı ve su buharı basıncıdır. R_d ve R_v kuru hava ve su buharı için verilen gaz sabitleridir [28].

3.3. Yinelemeli Oda Sıcaklığı Hesaplama

Örnek hacimde oluşan enerji birikimi ve son sıcaklık kestirildikten sonra bir maliyet analizi yapılmıştır. Maliyet analizi elektrik tüketimi, karbon emisyonu ve fiyat hesaplamalarını içermektedir. Söz konusu hacim soğutulduğunda karşılaşılabilecek elektrik tüketimi, karbon emisyonu ve fiyat için kestirim yapılmıştır. Kestirim için bir model [29] kullanılmıştır. Son sıcaklığı düşürmek için gereken enerji, soğutma yükü hesaplamasında iletim yükü ve sızma yükü kullanılarak hesaplanır. İletim yükü Eşitlik 24 ile verilmektedir.

$$Q_t = U \cdot S \cdot (T_f - T_i) \quad (24)$$

Burada Q_t ısı iletim yükü, T_f son sıcaklık, T_i hedef sıcaklık, U ısı aktarım sabiti ve S iletim kesit alanıdır. Sızma yükü Eşitlik 25'te verilmiştir.

$$Q_{sl} = q_v \cdot c_p \cdot \rho \cdot (T_f - T_i) \quad (25)$$

Burada c_p havanın özısıısı, ρ hava yoğunluğu ve q_v hacimsel hava akış hızıdır.

Karbon emisyonu kestirimi, elektrik tüketimi kestiriminden faydalanılarak gerçekleştirilmiştir. Karbon emisyonu kestirimi, elektrik üretmek için kullanılan üç enerji kaynağı için ayrı ayrı yapılmıştır. Enerji tüketiminden CO₂ emisyonuna dönüşüm, ABD Enerji Bilgi İdaresi tarafından sağlanan veri kaynağında verilen birim ölçütler kullanılarak yapılmış, Çizelge 3'te verilmiştir [30].

Çizelge 3. 2021 yılında ABD elektrik net üretimi ve karşılığında sebep olunan CO₂ emisyonu

	Elektrik üretimi (milyon kWh)	CO ₂ emisyonu (milyon metrik ton)	kWh başına libre
Kömür	897.885	919	1,03
Doğalgaz	1.579.361	696	0,44
Petrol	19.176	21	1,11

Referans elektrik fiyatları, ABD doları cinsinden küresel petrol fiyatlarından alınmıştır. Toplam fiyat, şehirlerdeki hane sayısı kullanılarak hesaplanmıştır.

3.4. Yöntem Uygulaması

Belirtilen parametreler ile belli hacimde bir bina odasının ısı kazancının tahmin edilmesi amaçlanmaktadır. Belirli geçirgenlik ve yansıtma özelliklerine ve boyutlara sahip pencerenin belli özelliklere sahip bina hacmi içinde güneş ısı kazancı kestirimini yapmak için ısı kazancı kestirimi yapılmıştır. Yöntem uygulaması İstanbul, Ankara, İzmir ve Adana için yapılmıştır. Ayrıca, bina hacimlerinin dört ana yöne baktığı durumlar için yaz aylarının belirli günlerinde ayrı ayrı simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Camların yüzey eğiminin $\beta = 90^\circ$ 'ye eşit olduğu varsayılmıştır. Hesaplamalar, standart yerel saate göre sabah, öğlen ve akşam olmak üzere üç yaz ayının ortasındaki gün için yapılmıştır. Bu şekilde, saatlik güneş ışınımının hesaplanmasında gerekli olan şehirlerin özellikleri, verilen tarih ve saatte LL boyları, ϕ enlemi, n gün sayısı, LT yerel standart saat ve γ azimut açısı Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Örnek binanın konumlandırıldığı şehirlerin coğrafi özellikleri

	LL	ϕ	LT	$n = 165^\circ$ γ	$n = 195^\circ$ γ	$n = 225^\circ$ γ
İstanbul	28,95	41,01	9	89,44	90,38	97,57
Ankara	32,85	39,92	9	91,13	92,33	99,71
İzmir	27,14	38,41	9	86,45	87,46	94,86
Adana	35,32	37,00	9	90,20	91,39	99,50
İstanbul	28,95	41,01	12	137,61	137,45	146,05
Ankara	32,85	39,92	12	144,38	143,73	152,07
İzmir	27,14	38,41	12	129,37	129,94	140,31
Adana	35,32	37,00	12	145,64	144,91	154,43
İstanbul	28,95	41,01	15	242,63	238,24	229,93
Ankara	32,85	39,92	15	248,84	244,67	235,97
İzmir	27,14	38,41	15	244,59	239,80	230,35
Adana	35,32	37,00	15	255,64	251,54	241,97

Azimut hesabı için Eşitlik 26 kullanılmıştır [28].

$$\cos \gamma = \frac{\cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \omega - \sin \delta \cdot \sin \phi}{\cos \gamma} \quad (26)$$

Burada δ , ϕ , ω ve γ sırasıyla deklinasyon açısı, enlem açısı, saat açısı ve güneş yükselti açısıdır. A , B ve C parametreleri ilgili n değerleri için Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarına karşılık gelen değerler Çizelge 2'den alınarak I_{bN} fonksiyonunun hesaplaması yapılmıştır. Standart meridyen L_s İzmit enlem derecesi 30° 'dir.

Güneşten gelen anlık ısı akşını ifade eden $\dot{q}_{anlık}$ değişkeninin hesaplanması Eşitlik 2'de verilmiş olup gerekli parametreler arasında yer alan yüzeye gelen toplam anlık güneş enerjisi G_{solar} bu çalışma kapsamında Çizelge 4'te verilen coğrafi nitelikler ve Çizelge 1'de verilen cam filmi tipleri baz alınarak yinelemeli olarak hesaplanmıştır. Yayılma katsayısının ϵ değeri Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Enerji Teknolojileri Laboratuvarı Departmanı'na sunulmuş bir proje raporuna [31] göre seçilmiş olup Eşitlik 1'in yinelemeli olarak hesaplanması için gerekli diğer elemanlarla birlikte Çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelge 5. $\dot{q}_{anlık}$ hesaplaması için gerekli parametre değerleri

$\epsilon \left(\frac{J}{m^2 \cdot s} \right)$	$\sigma \left(\frac{W}{m^2 K^4} \right)$	$T_{hava} (K^\circ)$	$T_s (K^\circ)$	$A_{cam} (m^2)$
0,84	$5,67 \times 10^{-8}$	285	298,15	50

Son olarak, bina hacminin son sıcaklığının hesaplanmasında bazı ek parametrelere ihtiyaç duyulmaktadır ve bu parametreler de bu çalışma kapsamında geliştirilen yinelemeli adımlar aracılığıyla uyarlamalı olarak kestirilmektedir. İlgili parametreler arasında Eşitlik 3 kullanılarak elde edilen 1 saat içindeki toplam ısı kazancının ($Q_{kazanç}$) hesaplanmasında kullanılan bina boşluğunun işgal ettiği hacmi $V_{oda} (m^3)$, odanın başlangıç sıcaklığı $T_{ilk} (K)$ ve odadaki kuru hava kütlesi $m_{kuru} (kg)$ vardır. Ayrıca, gerekli sabit parametreler sırasıyla havanın özgül ısı kapasitesi $C_p \left(\frac{kJ}{kg \cdot K} \right)$, kuru havanın özgül gaz sabiti $R_d \left(\frac{kJ}{kg \cdot K} \right)$, buharın özgül gaz sabiti $R_v \left(\frac{kJ}{kg \cdot K} \right)$, ideal gaz sabiti $R \left(\frac{kJ}{K \cdot mol} \right)$ ve havanın molar kütesidir $M \left(\frac{kg}{mol} \right)$. İlgili parametreler Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6. T_{son} hesaplaması için gerekli parametre değerleri

V_{oda}	T_{ilk}	m_{kuru}	C_p	R_d	R_v	R	M
480	298,15	600	1,005	0,2871	0,4615	$3,145 \cdot 10^{-4}$	$28,9647 \cdot 10^{-3}$

Türkiye'nin dört büyük şehri İstanbul, Ankara, İzmir ve Adana simülasyon için seçilmiştir. Bu dört şehir yerleşimin yoğun olmasının yanında farklı coğrafi konuma ve iklim özelliklerine sahiptir. Bu bakımdan

simülasyonun tutarlı sonuçları kolaylıkla gözlemlenebilir. Şehirlerin ortalama sıcaklıkları Çizelge 7'de verilmiştir.

Çizelge 7. Şehirlerin K cinsinden ortalama sıcaklıkları.

	Haziran	Temmuz	Ağustos
İstanbul	296	298	299
Ankara	293	297	297
İzmir	298	301	300
Adana	299	302	302

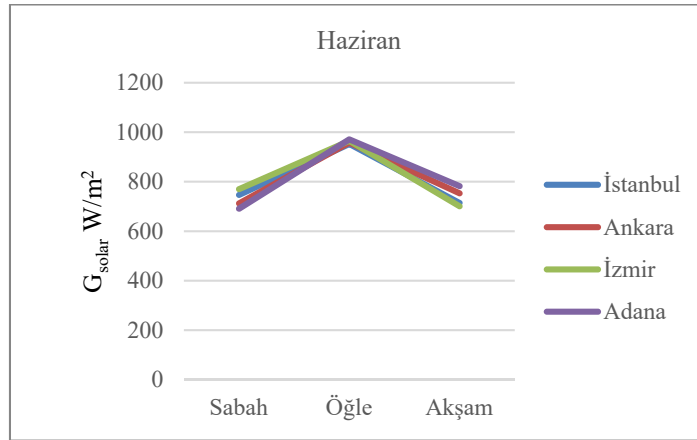
Şehirlerin büyüklükleri hane sayılarıyla ölçülmüştür. Hane sayıları elektrik tüketiminin ve karbon emisyonunun kestiriminin yapılmasında farklı büyüklükler sağlayarak karşılaştırmalı analiz yapılmasına imkân vermektedir. Hane sayıları Çizelge 8'de verilmiştir.

Çizelge 8. Şehirlerdeki hane sayıları.

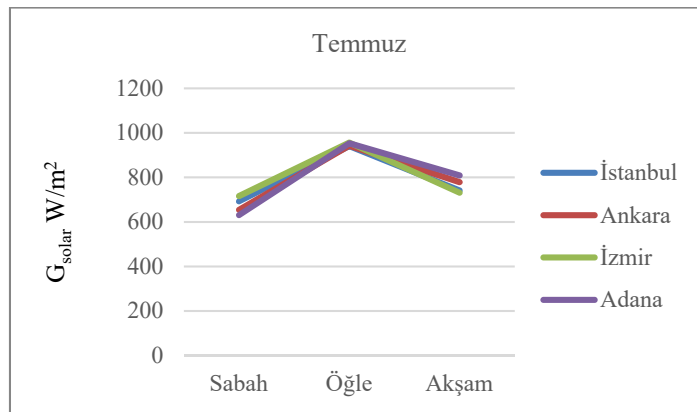
	Hane sayısı
İstanbul	3.886.890
Ankara	1.512.188
İzmir	1.263.312
Adana	535.719

4. BULGULAR

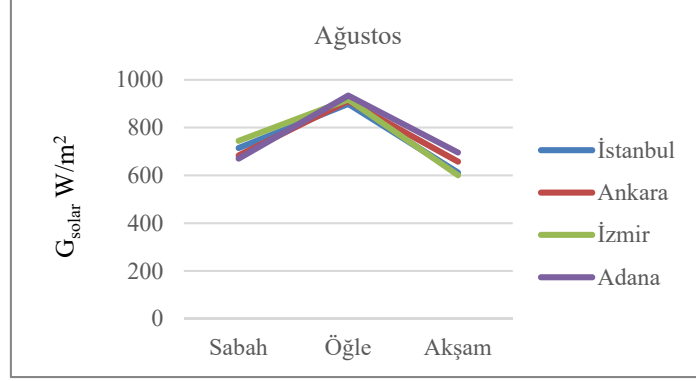
Her şehir için, yüzeye gelen toplam enerji G_{solar} ve tüm cam tipleri için odanın son sıcaklığını T_{son} hesaplanmıştır. T_{son} hesaplaması için gerekli olan $Q_{kazanç}$, anlık ısı kazancı G_{solar} kullanılarak hesaplanmıştır. G_{solar} hesaplamaları Şekil 1, 2 ve 3'te verilmiştir.



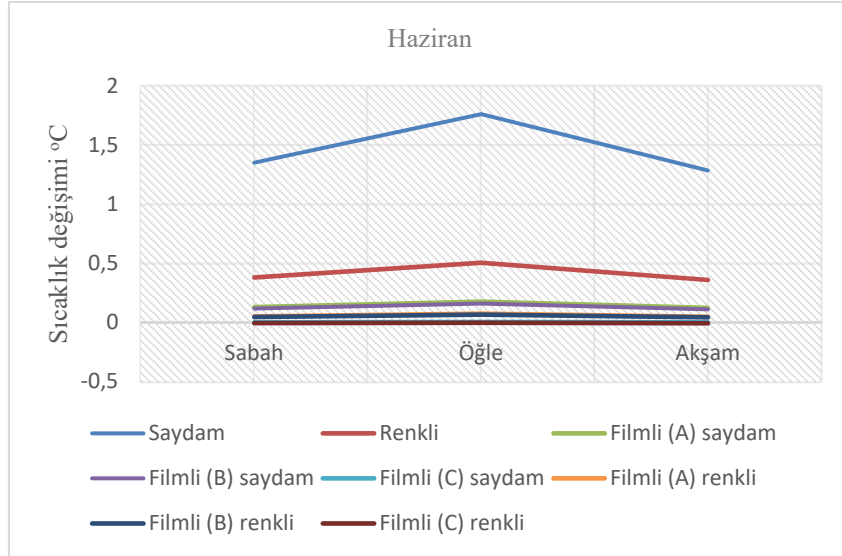
Şekil 1. 15 Haziran günü için anlık ısı kazancı G_{solar} hesaplamaları



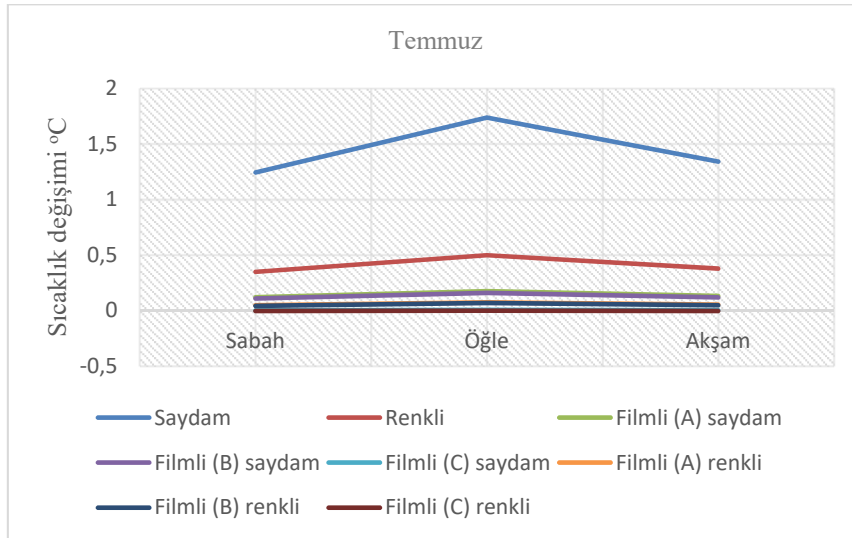
Şekil 2. 15 Temmuz günü için anlık ısı kazancı G_{solar} hesaplamaları

Şekil 3. 15 Ağustos günü için anlık ısı kazancı G_{solar} hesaplamaları

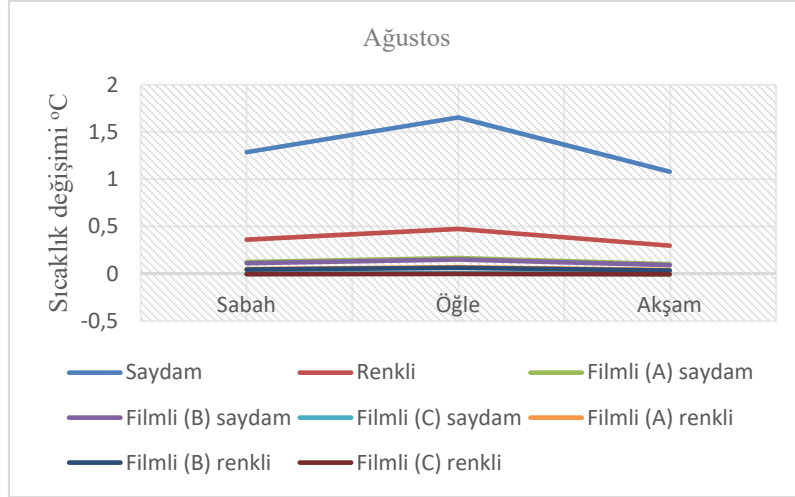
Hesaplanan G_{solar} değerleri güneş ışığının kuzey yarımküreye en dik açıyla geldiği haziran ayında buna paralel olarak en yüksek değerleri alıp ilerleyen aylarda değeri giderek azalmaktadır. Günün üç periyodu için hesaplama yapılmıştır. Sabah periyodu saat 9-12 aralığını; öğlen periyodu saat 12-15 aralığını ve akşam periyodu saat 15-18 aralığını kapsamaktadır.



Şekil 4. 15 Haziran günü için İstanbul'da son sıcaklığın referans sıcaklıktan farkı

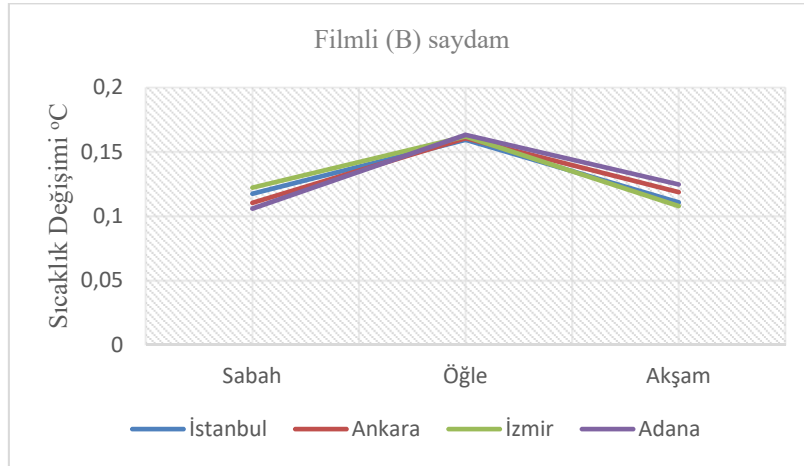


Şekil 5. 15 Temmuz günü için İstanbul'da son sıcaklığın referans sıcaklıktan farkı

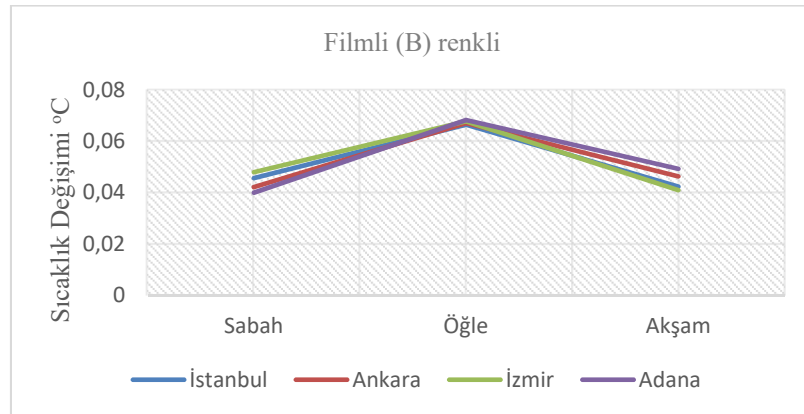


Şekil 6. 15 Ağustos günü için İstanbul'a göre son sıcaklığın referans sıcaklıktan farkı

Şekil 4, 5 ve 6'da 8 tipte cam filmi kullanımında sırasıyla 15 Haziran, 15 Temmuz ve 15 Ağustos günlerinde İstanbul coğrafi konumunda son iç hacim sıcaklığı ile referans sıcaklık arasındaki fark gösterilmiştir. Renkli camda saydam cama göre sıcaklık yükselişi daha düşük seviyelerdedir. Ancak film kullanımıyla birlikte sıcaklık yükselişleri ciddi miktarda azalmaktadır. C tipi film kullanımında sıcaklık farkının en düşük seviyede olduğu gözlemlenmektedir.

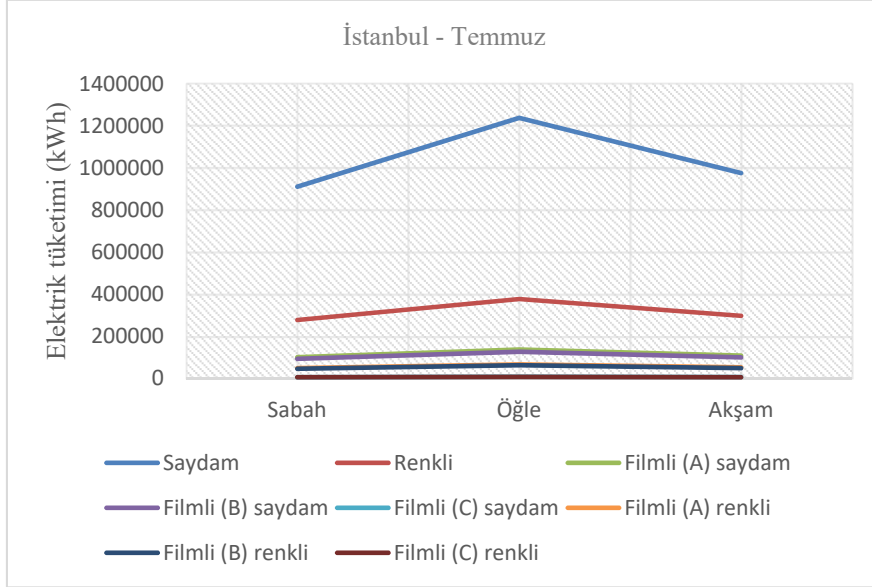


Şekil 7. 15 Haziran günü için saydam camda B tipi film kullanılması durumunda son sıcaklığın referans sıcaklıktan farkı

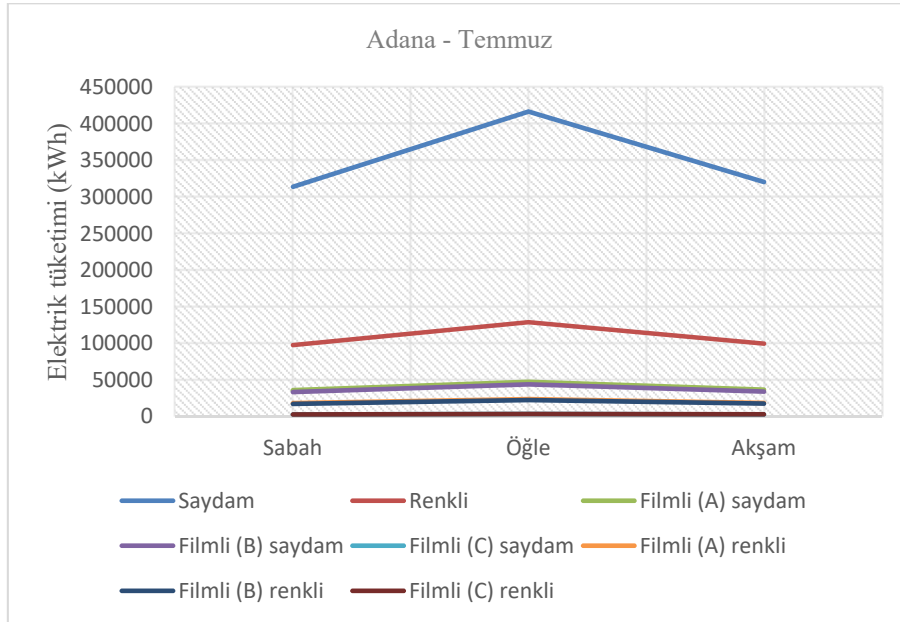


Şekil 8. 15 Haziran günü için renkli camda B tipi film kullanılması durumunda son sıcaklığın referans sıcaklıktan farkı

Şekil 7 ve 8’de sırasıyla saydam ve renkli cam üzerine B tipi film uygulamasında 15 Haziran gününün farklı periyotlarında farklı şehirler için son sıcaklık T_{son} ile referans sıcaklık T_S arasındaki fark verilmiştir. Renkli camda bu fark daha az olmakla birlikte film uygulamalarında sıcaklık farkının oldukça azaldığı gözlemlenmektedir. En yüksek ısı kazancı C tipi filmde görülmüştür.



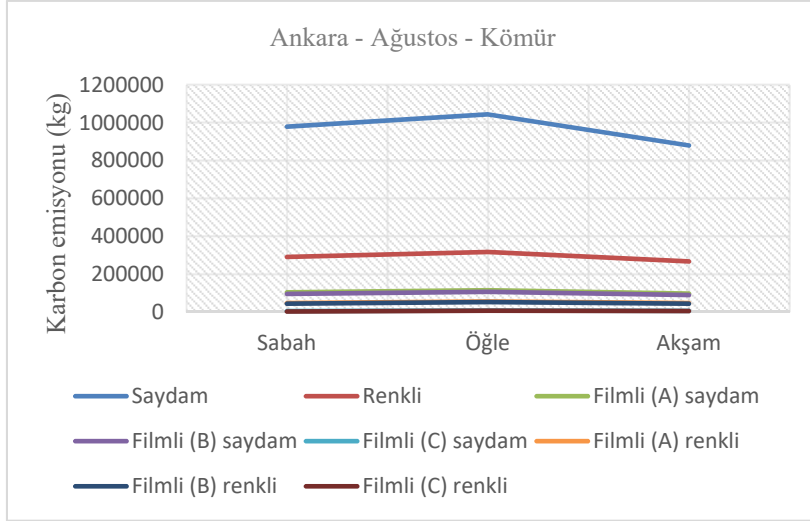
Şekil 9. İstanbul’da 15 Temmuz günü sıcaklık kontrolü sağlamak için gerekli enerji tüketimi



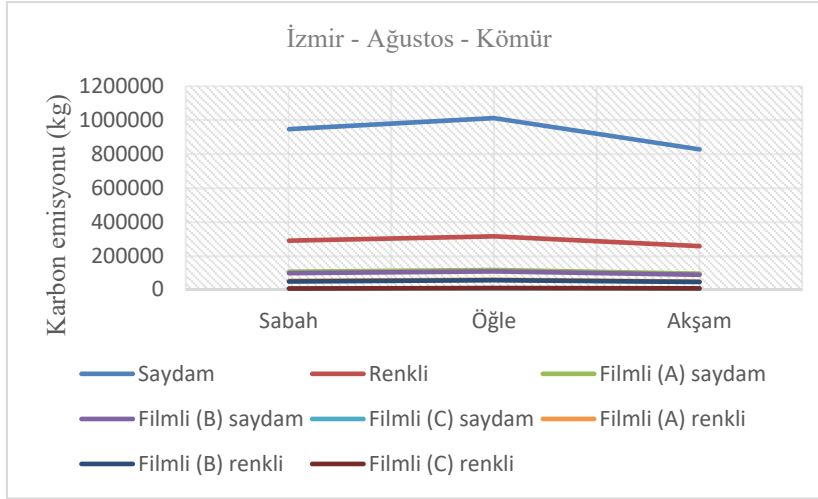
Şekil 10. Adana’da 15 Temmuz günü sıcaklık kontrolü sağlamak için gerekli enerji tüketimi

Şekil 9 ve 10’da İstanbul ve Adana’da 15 Temmuz gününde kestirilen son sıcaklığı referans sıcaklığa düşürmek için gerekli elektrik enerjisi tüketimi farklı cam filmi tipleri için verilmiştir. Görüldüğü üzere cam filmi uygulamalarında enerji tüketimi cam filmsiz duruma göre önemsiz sayılabilecek seviyelere düşmektedir.

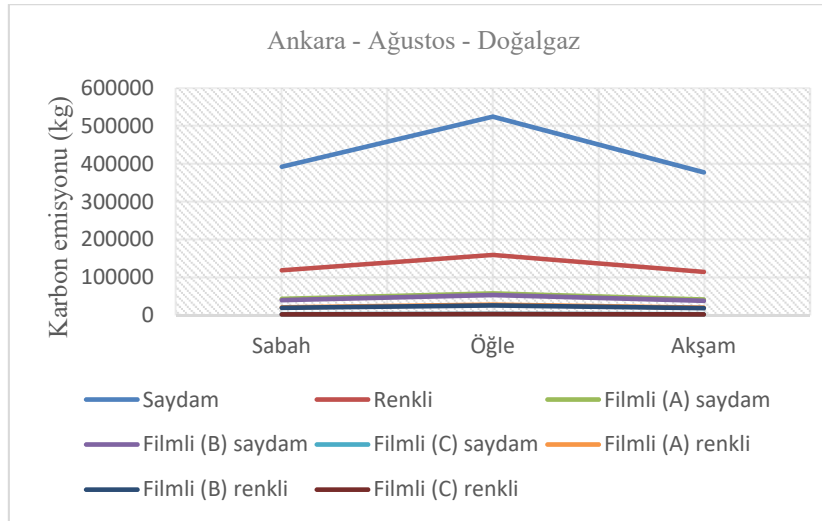
Şekil 11, 12, 13 ve 14’te Ankara ve İzmir’de enerji tüketimi sebebiyle ortaya çıkan karbon emisyonu Şekil 11 ve 12’de kömür kaynaklı üretim ve Şekil 13 ve 14’te doğalgaz kaynaklı üretim için verilmiştir. Şehirlerin coğrafi konumlarının farkı sebebiyle günün farklı periyotlarında karbon emisyonu miktarı farklılık gösterirken cam filmi uygulamalarında karbon emisyonu miktarında ciddi düşüşler gözlemlenmektedir.



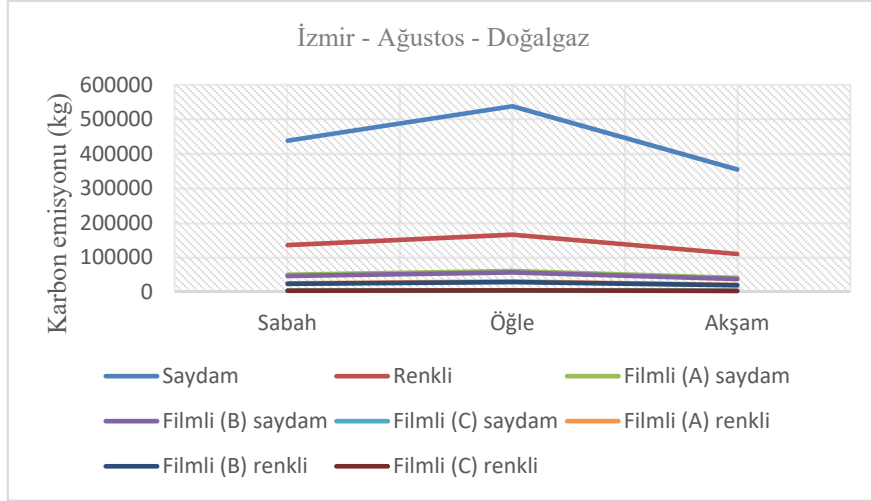
Şekil 11. Ankara'da 15 Ağustos günü sıcaklık kontrolü sağlamak için sebep olunan kömür kaynaklı karbon emisyonu



Şekil 12. İzmir'de 15 Ağustos günü sıcaklık kontrolü sağlamak için sebep olunan kömür kaynaklı karbon emisyonu



Şekil 13. Ankara'da 15 Ağustos günü sıcaklık kontrolü sağlamak için sebep olunan doğalgaz kaynaklı karbon emisyonu



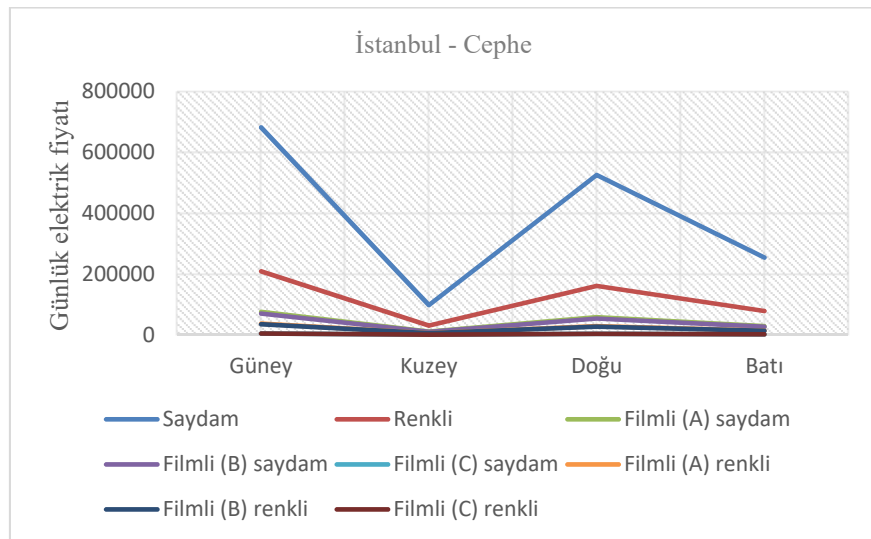
Şekil 14. İzmir’de 15 Ağustos günü sıcaklık kontrolü sağlamak için sebep olunan doğalgaz kaynaklı karbon emisyonu

Renkli cam uygulamasında saydam cama göre elektrik tüketimi ve karbon emisyonu bakımından avantaj sağlanırken cam filmli uygulamalarında tüketim ve emisyon önemli ölçüde azalmaktadır. Tüm cam filmli tipleri büyük oranda avantaj sunar ve özellikle C tipi film uygulamasında son sıcaklık ve referans sıcaklık arasındaki değişim en aza indirgenirken bu farktan dolayı tüketilen enerji miktarı ve karbon emisyonu buna paralel olarak azalmaktadır.

Çizelge 9’da farklı şehirlerde film uygulama maliyetleri verilmiştir. İstanbul en kalabalık şehir olduğu için buradaki film maliyeti en yüksek çıkmaktadır. Maliyet hesaplaması farklı zaman aralıkları için yapılmıştır. Film uygulamasının süreç içinde bağımsız bir maliyeti vardır. En az 5 yıllık garanti varsayımıyla maliyetin m² başına 40 \$ olacağı tahmin edilmektedir [32]. Bu nedenle, film uygulamasının maliyeti, çeşitli zaman aralıkları için 5 yıllık bir garanti varsayılarak tahmin edilmiştir.

Çizelge 9. Film uygulama maliyeti

	5 yıl (mn \$)	1 yıl (mn \$)	1 ay (mn \$)	1 gün (bin \$)	1 saat (bin \$)
İstanbul	2538,38	253,84	21,15	695,45	28,98
Ankara	987,55	98,76	8,23	270,56	11,27
İzmir	825,02	82,50	6,88	226,03	9,42
Adana	349,86	34,99	2,92	95,85	3,99



Şekil 15. İstanbul’da 15 Ağustos günü sıcaklık kontrolü sağlamak için tüketilen enerjinin maliyeti

Şekil 15'te farklı cephelere bakan bina yüzlerinde farklı cam filmi tipi uygulamalarında 15 Ağustos gününde faturaya yansıtacak toplam tüketim miktarı verilmiştir.

Çizelge 9'da İstanbul için verilen film uygulama günlük maliyetleriyle günlük elektrik tüketim maliyeti karşılaştırıldığında güney cephesinde cam filmi kullanımının özellikle fayda sağlayacağı söylenebilir. Karbon emisyonunda sağlanan büyük düşüş sayesinde dolaylı maliyetlerde uzun vadeli faydalar sağlanacağı aşikardır.

5. SONUÇLAR

Sonuçlar incelendiğinde, toplam güneş enerjisi öğle vaktinde en fazla, sabah ise en az miktardadır. Şehirler farklı konumlar ve nüfuslar göz önünde bulundurularak seçilmiştir. Bu nedenle farklı iklim koşullarına sahiptirler ve sonuçları farklı nüfus ölçeklerinde gözlemlemeye olanak sağlar. Sonuçlar, şehirlerin ülkenin standart meridyenine göre konumları ve güneş ışığının geliş açısı doğrudan enleme ilişkili olduğu için ekvator dan uzaklığın etkisi nedeniyle karmaşık bir model izlemektedir. Karbon emisyonu açısından sonuçlar enerji tüketimleri ile paralellik göstermektedir. Ayrıca, artan nüfus değerleri ile emisyon farkı daha büyük hale gelmektedir. Yine emisyon ve enerji tüketimine paralel olarak, enerji fiyatı dikkate alındığında filmsiz saydam cam ile filmli cam arasında belirgin bir fark vardır. Cephelerin ana yönlerine ortogonal baktığı varsayılarak dört cepheye farklı film türleri uygulandığında enerji tüketimi, sıcaklık etkisi, emisyon ve ekonomik sonuçlar gösterilmiştir. Film uygulamasının maliyeti göz önünde bulundurulduğunda, film uygulamasının başarılı bir yatırım olabilmesi için maliyet açısından etkin ve uygulanabilir olması gerekmektedir. Verilere bakılarak, film uygulama maliyetinin, C tipi saydam cam düşünüldüğünde, elektrik fiyatı açısından oldukça yüksek bir tasarruf sağladığı söylenebilir. Tasarruf edilen elektrik enerjisi maliyetinin, film uygulama maliyetinden önemli ölçüde daha düşük olduğu da anlaşılmaktadır. Ek olarak, düşük karbon emisyonunun küresel ısınmanın olası etkileri nedeniyle gelecekteki maliyetlerin yükünü hafiflettiği unutulmamalıdır.

6. KAYNAKLAR

1. Ulaş, A. (2010). Binalarda TS 825 hesap yöntemine göre ısı kaybı, yakıt tüketimi, karbondioksit emisyonu hesabı ve maliyet analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 155.
2. Bektaş, B. ve Aksoy, U.T. (2005). Soğuk iklimlerdeki binalarda pencere sistemlerinin enerji performansı. *Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Der.*, 17(3), 499-508.
3. Gago, E.J., Muneer, T., Knez, M. & Köster, H. (2015). Natural light controls and guides in buildings. Energy saving for electrical lighting, reduction of cooling load. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1-13.
4. Rezaei, S.D., Shannigrahi, S. & Ramakrishna, S. (2017). A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 159, 26-51.
5. Cuce, E. (2018). Accurate and reliable U-value assessment of Argon-filled double glazed Windows: a numerical and experimental investigation. *Energy and Buildings*, 171, 100-106.
6. Aycam, I. (1999). Farklı malzemelerle üretilen pencere tiplerinin ısı performanslarının incelenmesi ve enerji etkin pencere seçimi. *1999 IV. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi (TESKON'99)*, Türkiye, 61-73.
7. Cuce, E. & Riffat, S.B. (2015). A state-of-the-art review on innovative glazing technologies. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 41, 695-714.
8. Huang, Y., Niu, J.-L. & Chung, T.-M. (2014). Comprehensive analysis on thermal and daylighting performance of glazing and shading designs on office building envelope in cooling-dominant climates. *Appl. Energy*, 134, 215-228.
9. Wang, L. & Greenberg, S. (2015). Window operation and impacts on building energy consumption. *Energy Build*, 92, 313-321.
10. Meszaros, R., Merle, B., Wild, M., Durst, K., Göken, M. & Wondraczek, L. (2012). Effect of thermal annealing on the mechanical properties of low-emissivity physical vapor deposited multilayer-coatings for architectural applications. *Thin Solid Films*, 520, 7130-7135.
11. Li, C., Tan, J., Chow, T.T. & Qiu, Z. (2015). Experimental and theoretical study on the effect of window films on building energy consumption. *Energy Build*, 102, 129-138.

12. Yousif, K. M. (2012). Control of solar heat gain to reduce the energy consumption of buildings in Iraq. *2012 Proceedings of the World Renewable Energy Forum*, Denver, CO, USA, 13-17.
13. Yin, R., Xu, P. & Shen, P. (2012). Case study: energy savings from solar window film in two commercial buildings in Shanghai. *Energy Build*, 45, 132-140.
14. Dussault, J.-M., Gosselin, L. & Galstian, T. (2012). Integration of smart windows into building design for reduction of yearly overall energy consumption and peak loads. *Solar Energy*, 86, 3405-3416.
15. Chen, B., Ji, Y. & Xu, P. (2012). Impact of window shading devices on energy performance of prototypical buildings. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*, 3(11), 5994-5999.
16. Vanhoutteghem, L., Skarning, G.C.J., Hvii, C.A. & Svendsen, S. (2015). Impact of façade window design on energy, daylighting and thermal comfort in nearly zero-energy houses. *Energy Build*, 102, 149-156.
17. Hee, W., Alghoula, M.A., Bakhtyar, B., Elayeba, O., Shameri, M.A. & Alrubaih, M.S. (2015). The role of window glazing on daylighting and energy saving in buildings. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 42, 323-343.
18. Yang, Q., Liu, M., Shu, C., Mmereki, D., Hossain, U. & Zhan, X. (2015). Impact analysis of window-wall ratio on heating and cooling energy consumption of residential buildings in hot summer and cold winter zone in China. *J. Eng.*, 538254, 1-17.
19. Jelle, B.P., Gustavsen, A., Nilsen, T.N. & Jacobsen, T. (2007). Solar material protection factor (SMPF) and solar skin protection factor (SSPF) for window panes and other glass structures in buildings. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91(4), 342-354.
20. Gure, N. & Yilmaz, M. (2016). Alternative solution via car window filming implementation to combat global warming and resulted benefits around geographic Europe and the European Union. *Int. J. Global Warming*, 10(1-3), 263-290.
21. Cengel, Y.A. & Boles, M.A. (2007). *Thermodynamics: an engineering approach*. McGraw-Hill, New York, 1009.
22. Maleki S.A.M., Hizam H. & Gomes C. (2017). Estimation of hourly, daily and monthly global solar radiation on inclined surfaces: models re-visited. *Energies*, 10, 134.
23. Spencer, J.W. (1971). Fourier series representation of the position of the sun. *Applied Optics*, 10, 2569-2571.
24. Badescu, V. (2002). 3D isotropic approximation for solar diffuse irradiance on tilted surfaces. *Renew. Energy*, 26, 221-233.
25. Gueymard, C. (1993). Critical analysis and performance assessment of clear sky solar irradiance models using theoretical and measured data. *Sol. Energy*, 51, 385-397.
26. ASHRAE, (1997). Handbook: fundamentals, Chapter 29, *Fenestration*, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., Atlanta GA.
27. Iqbal, M. (1983). *An introduction to solar radiation*. Academic Press, Toronto, ON, Canada, 408.
28. Picard, A., Davis, R.S., Glaser, M. & Fujii, K. (2008). Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007). *Metrologia*, 45, 149-155.
29. Wang, N., Zhang, J. & Xia, X. (2013). Energy consumption of air conditioners at different temperature set points. *Energy and Buildings*, 65, 412-418.
30. U.S. Energy Information Administration, State Electricity Profiles, U.S. Profile, Table 5 and 7, <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=74&t=11>, Erişim tarihi: 21.12.2023, 2023, Washington DC.
31. Winckler, L., & DeBusk, S. (2012). Final report on work performed under agreement. (DE-FOA-0000115).
32. Cengel, Y.A. & Ghajar, A. (2010). *Heat and mass transfer: fundamentals and applications*. McGraw-Hill, New York, 991.



Remote Sensing-Based Deep Learning Approach for Identifying Burned Forest Areas

Reha PAŞAOĞLU^{1,a}, Ahmet Ertuğrul ARIK^{1,b}, Nuri EMRAHOĞLU^{1,c}

¹Osmaniye Korkutata University, Kadirli Vocational School, Osmaniye, Türkiye

^aORCID: 0000-0002-4260-5468; ^bORCID: 0000-0002-7952-4311; ^cORCID: 0000-0003-4347-5279

Article Info

Received : 18.09.2024

Accepted : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665481

Corresponding Author

Ahmet Ertuğrul ARIK

ertugrul.arik@kapadokya.edu.tr

Keywords

Deep learning

Sentinel 2

NBR-dNBR

BAIS2-dBAIS2

Remote sensing

How to cite: PAŞAOĞLU, R., ARIK, A.E., EMRAHOĞLU, N., (2025). Remote Sensing-Based Deep Learning Approach for Identifying Burned Forest Areas. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(1), 33-48.

ABSTRACT

In this study, the burned areas and intensity of forest fires that occurred in the Samandağ region of Hatay between September 5-10, 2020, are mapped. Analyses were carried out using deep learning, remote sensing, and satellite data from Sentinel 2. With Sentinel 2 satellite photos of the research locations, an image dataset for deep learning was constructed. Then, using deep learning approaches, a deep learning model was developed, trained using the photos in the dataset, and successfully tested. Images from Sentinel 2 were used to produce the Normalized Burn Ratio(NBR) and Burned Area Index for Sentinel 2 (BAIS2) indices using the results of a new deep learning model. Calculating the Difference Normalized Burning Intensity (dNBR) and Burned Area Index for Difference Sentinel-2 (dBAIS2) values for the discrepancies between these indices before and after the fire allowed for categorization and determination of the fire area. The deep learning approach burned area indexes, and General Directorate of Forestry (GDF) fire registration slips were compared, and it was established that the new deep learning model was more effective at locating burned forest areas than the indexes. In identifying the burnt forest areas, the new model has a proportionate accuracy of 98.36% in the Samandağ study region.

Yanmış Orman Alanlarının Belirlenmesi için Uzaktan Algılama Tabanlı Derin Öğrenme Yaklaşımı

Makale Bilgileri

Geliş : 18.09.2024

Kabul : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665481

Sorumlu Yazar

Ahmet Ertuğrul ARIK

ertugrul.arik@kapadokya.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Derin öğrenme

Sentinel 2

NBR-dNBR

BAIS2-dBAIS2

Uzaktan algılama

Atf şekli: PAŞAOĞLU, R., ARIK, A.E., EMRAHOĞLU, N., (2025). Yanmış Orman Alanlarının Belirlenmesi için Uzaktan Algılama Tabanlı Derin Öğrenme Yaklaşımı. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(1), 33-48.

ÖZ

Bu çalışmada, 5-10 Eylül 2020 tarihleri arasında Hatay'ın Samandağ bölgesinde meydana gelen orman yangınlarının yanık alanları ve şiddeti haritalandırılmıştır. Derin öğrenme, uzaktan algılama ve Sentinel 2 uydu verileri kullanılarak analizler yapılmıştır. Araştırma bölgelerine ait Sentinel 2 uydu fotoğrafları ile derin öğrenme için bir görüntü veri seti oluşturulmuştur. Ardından, derin öğrenme yaklaşımları kullanılarak bir model geliştirilmiş, bu model veri setindeki fotoğraflarla eğitilmiş ve başarıyla test edilmiştir. Sentinel 2'den elde edilen görüntüler, yeni derin öğrenme modelinin sonuçları kullanılarak Normalleştirilmiş Yanma Yoğunluğu (NBR) ve Yanık Alan İndeksi (BAIS2) değerleri hesaplanmıştır. Yangın öncesi ve sonrası bu indeksler arasındaki farklılıkların hesaplanmasıyla Farklı Normalleştirilmiş Yanma Yoğunluğu (dNBR) ve Farklı Yanık Alan İndeksi (dBAIS2) değerleri elde edilerek yangın alanı kategorize edilmiş ve belirlenmiştir. Derin öğrenme yaklaşımı, yanık alan indeksleri ve Orman Genel Müdürlüğü yangın kayıt fişleri karşılaştırılmış ve yeni derin öğrenme modelinin yanmış orman alanlarını belirlemede indekslere göre daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Samandağ çalışma bölgesinde, yanık orman alanlarının belirlenmesinde yeni modelin doğruluk oranı %98,36 olarak hesaplanmıştır.

1. INTRODUCTION

This article is based on the findings of the thesis titled 'Comparison of Deep Learning Methods with Burned Area Indices in the Detection of Burned Forest Areas: The Case of Hatay.

Forest fires are among the natural events that most significantly affect the global ecosystem. While the incidence of fires has increased due to environmental climate changes, many fires are human-induced. The rise in the world's population has led to increased utilization of forest areas and a higher demand for forest products. Forest fires cause considerable damage to the geographies in which they occur and negatively impact all life forms. With climate changes, air temperatures are now frequently exceeding average levels compared to previous years, creating favorable conditions for forest fires. In a world where global warming has reduced precipitation and led to the formation of deserts, forest fires pose a significant threat to our ecosystem. According to the most recent statistics, the annual loss of forest area due to fires has risen to 13 million hectares [1] In our country, only 1.6% of the total 27 million hectares of forest area is protected [2].

On the other hand, the ecology of the Mediterranean basin has developed significant resilience against severe forest fires. In recent years, there has been an increase in the number of forest fires, which has the potential to disrupt this balance [3]. Forest fires are one of the most serious dangers threatening natural life and are a major cause of economic losses due to the disruption of forestry activities. Additionally, forest fires are a significant source of air pollution.

Fires have the potential to adversely affect the natural environment, including flora, water, and air. They not only damage the forests in the vicinity but also threaten homes and farms in the area, causing both human and material losses [4]. The increase in forest fires complicates fieldwork, hence remote sensing techniques are crucial for identifying burned forest areas and formulating an emergency strategy.

The detection and analysis of such fire-affected areas are critical for implementing accurate policies swiftly. Consequently, the use of remote sensing methods has gained significant importance in recent years due to their speed and cost-effectiveness in detection and data collection, becoming increasingly widespread. Remote sensing is a crucial factor in the detection and analysis of forest fires. In countries with vast territories like Australia and Russia, identifying fires or determining burn rates using traditional methods is very challenging and time-consuming. Therefore, remote sensing is the fastest method for assessing forest fires. Any type of earth observation tool capable of collecting data can be used in remote sensing; this tool could be an aircraft, satellite, or UAV.

The use of aircraft in remote sensing methods for fighting forest fires can be extremely advantageous from many different aspects, from coordinating tactical operations and extinguishing activities to the rapid evacuation of the injured and the transport of personnel and materials. In Turkey, forest fires are a common occurrence during the summer months, especially in regions surrounding the Mediterranean and Aegean seas. Given the magnitudes of recent fires, disaster management requires meticulous attention [5].

In recent years, satellites have been extensively used for fire detection and analysis [6,7]. Satellites possess multiple and wide-range bands, enabling them to perform object classification based on different spectral reflectance values. The reflected radiation values from healthy vegetation, burned forest areas, soil, or water are distinct. Consequently, forest fires can be easily detected through certain calculations. Indices that identify burning or burned areas can be utilized in detection and analysis processes.

Furthermore, with the advancement of computer learning methods like deep learning, fire detection and analysis operations have become faster and have shifted towards these technologies. Deep learning techniques leverage the multi-spectral data provided by satellites to effectively distinguish between burned and unburned areas, enhancing the accuracy and efficiency of fire mapping. These advancements not only improve response times but also help in better management and recovery planning in post-fire scenarios.

2. RELATED STUDIES

In the past, burned forest areas were identified using ground surveys and maps; however, fires can now be rapidly monitored worldwide through remote sensing techniques [8].

Key and colleagues [9] developed a new index called the Normalized Burn Ratio (NBR) using bands 4 and 7 from Landsat TM data. This index was applied to data from two fires in Montana's Glacier National Park in 1994, and it was found that NBR was more successful in detecting burn severity compared to the Composite Burn Index (CBI).

Miller et al. [10] introduced the Difference Normalized Burn Ratio (dNBR) for mapping the burn severity of forest areas. This index was tested on 14 fires in California, USA, and its effectiveness was confirmed.

Filipponi [11] developed a new burned area detection index for Sentinel-2 data. This new index was applied to a fire in Sicily, Italy, in 2017 and was found to be more successful than the NBR index.

Mpakairi et al. [12] used six commonly employed indices along with Landsat 8-OLI data for two fires in northwestern Zimbabwe and classified them using the Random Forest (RF) machine learning algorithm. The Optimized Soil Adjusted Vegetation Index (OSAVI) and Normalized Burn Index (NBI) performed much better than any other spectral indices considered at both research locations. The Burned Area Index (BAI) was the third best performing spectral index. Both OSAVI and NBI showed better performance due to adjustments made for soil effects and the inclusion of the blue spectral band to account for atmospheric effects.

Tanasse et al. [13] developed a locally adapted multi-temporal two-phase burn area (BA) algorithm. It uses shortwave and near-infrared band reflectance measurements from Sentinel-2 MSI and also active fire detections by the Terra and Aqua MODIS sensors. Covering an area of approximately 25 million km² in Sub-Saharan Africa, burned areas were detected using this algorithm with a spatial resolution of 20 m from January to December 2016, marking the first high-resolution BA study using Sentinel-2 for such an extensive area.

Llorens et al. [14] developed and applied a technique to estimate the total area damaged by forest fires in Spain and Portugal in October 2017. MODIS (250 m) images were compared with the European Forest Fire Information System (EFFIS) database. Sentinel-2 and EFFIS showed a strong correlation for estimating burn severity as indicated by the separability index (SI) and kappa statistic (k), with all cases having SI values higher than one and k values greater than 0.69. This study concluded that Sentinel-2 dNBR is a suitable alternative to the EFFIS fire parameter, particularly in situations where it's crucial to identify details within the fire itself.

Wang et al. [15] developed a new method involving the Vegetation Difference Index (VDI) and Burn Scarring Index (BSI) models for calculating burned crop areas. The VDI model can significantly reduce the confusing effect of background information related to vegetation (forests and grasslands), water bodies, and buildings. The combination of VDI and BSI allows for the reduction of the influence of non-agricultural information by VDI, thus enhancing the accuracy and speed of the BSI model. The effectiveness of the VDI and BSI models was tested for a winter wheat planting area in Central China.

Ramo et al. [16] evaluated how four widely used remote sensing classification algorithms—Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM), Neural Networks (NN), and a well-known decision tree method (C5.0)—performed. Over 130 Landsat images were used to compile a database of burned and unburned pixels for training purposes. Due to the burned class constituting less than one percent of the total, the resulting database was found to be highly imbalanced. RF showed the best performance compared to reference data for the remaining regions (Angola, Sudan, and South Africa). In a study analyzing forest fires in the Manavgat region of Antalya province in 2021, Arıkan et al. [17] used the Burned Area Index (BAI), Relative Burn Ratio (RBR), Normalized Burn Ratio (NBR), Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI), Normalized Vegetation Index (NDVI), and Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI). Subsequently, Machine Learning (ML) classification tools such as Random Forest (RF) Algorithm, Support Vector Machine (SVM), and Classification Regression Tree (CART) were used to rank the data. The results

showed that the Random Forest (RF) was the most accurate algorithm with an overall accuracy of 98.57%, while Support Vector Machines (SVM) were the least accurate method.

Seydi et al. [18] utilized the Deep Siamese Morphological Neural Network (DSMNN-Net) architecture, whose main theme is change detection. The proposed network integrates multi-scale convolution layers with morphological layers to generate deep features. The effectiveness of this approach was evaluated on two fire-damaged areas in Australian forests. The method, using multispectral Sentinel-2 and hyperspectral PRISMA datasets, found a general accuracy index of 98% and a Kappa value over 0.9.

Belenguier-Plomer et al. [19] mapped burned areas (BA) using a deep learning approach that includes radar and optical data from Sentinel-1 and Sentinel-2 sensors. The observed land cover class and data type were primary criteria to determine the optimal CNN size and data normalization method. Using a well-defined CNN within a joint active/passive data combination, a DC value of 0.57 was found for Sentinel-1 and a DC of 0.7 for burned area mapping based on Sentinel-2, similar to or slightly higher in accuracy than previous approaches based on Sentinel-2.

A multitude of methods have been developed to identify burned areas using satellite images. Most of these solutions require time-consuming preprocessing, and deep learning approaches have not yet been extensively explored [20]. Knopp et al. [20] combined current advancements in sensor technology and techniques to provide an autonomous process chain for burned area segmentation based on deep learning. A U-Net architecture was used to train a convolutional neural network (CNN). The final segmentation model had a general accuracy of 0.98 and a kappa correlation of 0.94. Arruda et al. [21] developed a new method for mapping burned areas in Brazil's Cerrado region using a Deep Learning algorithm to analyze Landsat images via Google's Earth Engine and Cloud Storage. The mapped areas were compared with the INPE Burned Area Product (30 m resolution) and the MODIS MCD64A1 Burned Area Product (500 m resolution), finding an accuracy rate of 97%.

Hu et al. [22] demonstrated how deep learning (DL) models can autonomously map burned areas using single-time multi-band images. Sentinel-2 and Landsat-8 data were evaluated using machine learning techniques, and according to validation results, DL algorithms outperformed machine learning approaches. This study showed that combining contextual information from fire-sensitive spectral bands and geographic data allows deep learning algorithms to map burned spots effectively.

Ghali and Akhloufi [23] provided a comprehensive review of deep learning models, emphasizing the effectiveness of CNNs, U-Net, and LSTMs for fire monitoring. Their findings indicate that CNN-based architectures achieve superior accuracy in fire detection, while hybrid models such as CNN-LSTM offer improved wildfire spread prediction.

In addition to these remote sensing-based methods, recent research highlights the increasing effectiveness of deep learning methods in promptly and accurately detecting forest fires. Within this context, Sathishkumar et al. [24] integrated a "Learning Without Forgetting" (LwF) approach into deep learning-based image classification models, proposing a novel framework for forest fire and smoke detection. Their study employed various pre-trained convolutional neural network (CNN) architectures, including VGG16, InceptionV3, and Xception, achieving an accuracy rate of approximately 98.72% with the Xception model. Furthermore, to address the issue of "catastrophic forgetting"—the loss of previously acquired knowledge when models are trained on new data—the authors utilized LwF. This technique not only preserved the performance on the original dataset but also yielded high accuracy on an additional fire/smoke dataset (BoWFire). As a result, this method effectively maintains performance on previously learned tasks while also learning new tasks, thereby enhancing both the accuracy and generalization capability of forest fire detection [24].

Chen et al. [7] conducted a comparative study using Sentinel-1B and 2A imagery and found that the Support Vector Machine (SVM) achieved the highest accuracy (93.52%) in the pre-fire period when combined with spectral and NDVI indices, whereas the Random Forest (RF) algorithm outperformed others during the fire event, reaching an overall accuracy of 95.43% when utilizing spectral and Normalized Burn Ratio (NBR) features. Moreover, in the post-fire stage, SVM again exhibited superior performance (94.97%) when incorporating spectral and radar backscatter coefficients, underscoring the importance of selecting optimal machine learning algorithms for different fire periods.

3. MATERIALS AND METHODS

3.1. Study Area

In this study, the forest fire that occurred in the Samandağ region of Hatay between September 5 and 10, 2020, was analyzed, as shown in Figure 1. Information on the fire-affected areas was obtained from the Ministry of Agriculture and Forestry and utilized in this research.

According to the Ministry's reports, the fire in the Yeniköy area of the Samandağ district, Hatay province, was brought under control after five days. High temperatures and low humidity were among the key factors that exacerbated the fire's spread. These environmental conditions not only influenced fire behavior but also played a crucial role in shaping the strategy and effectiveness of the firefighting efforts. Given the impact of such factors, accurate post-fire analysis is essential for understanding the severity of the fire and guiding future prevention measures.

To achieve this, remote sensing techniques were utilized to detect and analyze the burned areas. Fire indices, such as the Normalized Burn Ratio (NBR), offer valuable insights by highlighting changes in vegetation and soil conditions due to fire. These indices are particularly useful in assessing the extent and intensity of the damage in a quantitative manner, providing a clearer understanding of the affected area.

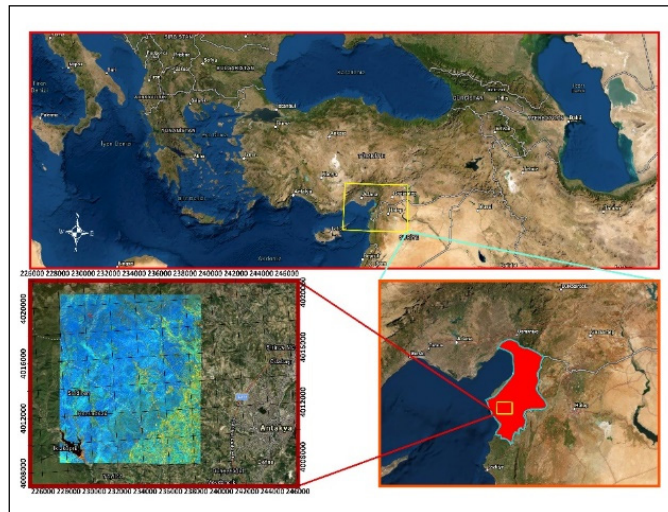


Figure 1. Samandağ study area

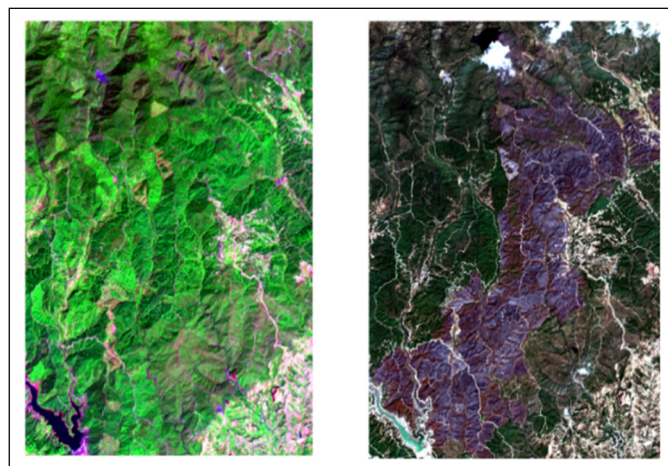


Figure 2. Samandağ fire satellite data before and after

In Figure 2, the differences between the pre-fire and post-fire satellite data are easily noticeable, with the burned areas clearly distinguishable in dark brown on the second image.

3.1.1. Fire Indices Used During Fire Area Detection

3.1.1.1. NBR and dNBR

The Normalized Burn Ratio (NBR) utilizes Near-Infrared (NIR) and Short-Wave Infrared (SWIR) bands and is sensitive to changes in live vegetation, moisture content, and specific soil conditions [10]. Thus, the NBR index is used for detecting burned areas, and it is expressed using mathematical formulas derived from NIR and SWIR bands [10,25]. The value range for the NBR index spans from -1 to +1.

$$NBR = \frac{(NIR-SWIR)}{(NIR+SWIR)} \quad (1)$$

To classify the severity of burned areas, the difference Normalized Burn Ratio (dNBR or ΔNBR) index is used, which is calculated by subtracting the pre-fire NBR index values from the post-fire NBR index values [26]. This index provides a clear distinction in the severity of the fire impact.

The dNBR formula is expressed as:

$$\Delta NBR = NBR (Pre_{fire}) - NBR (Post_{fire}) \quad (2)$$

The use of dNBR is particularly effective because it quantifies the changes in reflectance characteristics before and after a fire, reflecting the degree to which the fire has altered the landscape. A higher dNBR value typically indicates greater fire severity, as more vegetation loss and soil exposure or charring are detected. The dNBR values are classified into categories to represent different levels of burn severity, from low to high, which helps in planning restoration activities and evaluating fire management effectiveness [10]. This method is widely utilized in ecological studies and forest management to assess fire damage and monitor the ecological recovery of burned areas over time.

Theoretically, the range of the difference Normalized Burn Ratio (dNBR) should be between -2 and +2, but in practice, the range most commonly associated with burned areas is between 0.1 and 1.35. Areas that are unburned typically exhibit dNBR values between -0.1 and 0.1 [27,28].

3.1.1.2. BAIS2 and dBAIS2

Filipponi developed a new approach called BAIS2 (Burned Area Index for Sentinel-2) based on the rich band resolution provided by Sentinel-2 data, accurately detecting burned areas [11]. This method was first employed by Filipponi in 2018. It is calculated using the following formula:

$$BAIS2 = \left(1 - \sqrt{\frac{B6+B7+B8A}{B4}} \right) * \left(\frac{B12-B8A}{\sqrt{B12+B8A}} + 1 \right) \quad (3)$$

Where B4 (0.665 μm), B6 (0.740 μm), B7 (0.783 μm), B8A (0.865 μm) and B12 (2.190 μm) are the spectral bands of the Sentinel 2 satellite image [29].

$$BAIS2(dBAIS2) = BAIS2(Pre_{Fire}) - BAIS2(Post_{Fire}) \quad (4)$$

The BAIS2 value range for burn signs is from -1 to 1, while the range for actively burning flames is from 1 to 6. It is possible to choose between various BAIS2 value thresholds to reflect various fire intensity densities. The available numbers have been chosen as they have been found to offer consistent results for fires in locations mostly located in the Mediterranean Sea.

3.1.1.3. NDWI

The Normalized Difference Water Index (NDWI), developed by McFeeters, is a tool used to enhance the detectability of water bodies in satellite imagery by leveraging the differential reflectance in the green and near-infrared (NIR) bands [30,31]. This index effectively distinguishes water by increasing the reflection amount in the green band and decreasing it in the NIR band, making water bodies stand out due to their unique spectral properties.

The formula for calculating NDWI is as follows:

$$NDWI = \frac{(Green-NIR)}{(Green+NIR)} \quad (5)$$

Where "Green" refers to the wavelength range that covers green light, and "NIR" denotes the near-infrared spectrum. For the Sentinel-2 satellite, the Green is represented by Band 3 (B3), and NIR by Band 8 (B8) [32,33].

The NDWI values range from -1 to 1, with positive values typically indicating the presence of water. This index is particularly valuable for creating water masks in remote sensing applications, enabling the straightforward exclusion of water areas from land analysis. In your study, the NDWI index was utilized to identify water areas, which were easily masked out from the rest of the imagery, facilitating the focus on terrestrial features and phenomena without the interference of water bodies. This method is crucial for accurate environmental monitoring and management, particularly in areas where water presence significantly influences the ecological or hydrological dynamics.

3.2. Method

3.2.1. Obtaining Satellite Images

Satellite data of the study areas were obtained by downloading Sentinel 2D satellite images from the Copernicus Open Access Hub of the European Space Agency (<https://scihub.copernicus.eu>). The closest time to the fire events and the clearest satellite images in terms of cloud cover were selected. The pre-fire and post-fire

Sentinel 2D satellite images of Samandağ study areas were selected and downloaded from the European Space Agency open access data.

Table 1 Study area satellite data

Study area	Satellite image	Percent cloudiness (%)	Image acquisition date
Samandağ	S2B_MSIL2A_20200828T081609_N0214_R121_T36SYF	6.622	28/08/2020
Study area	S2B_MSIL2A_20200917T081609_N0214_R121_T36SYF	12.727	17/09/2020

Satellite data for the study areas are given in Table 1 Image acquisition dates and cloudiness percentages of the data are indicated. Pre-fire and post-fire images were selected to provide the best view of the study area. It was important that there were few areas in the fire areas that would be obstructed by clouds. Clouds and cloud shadows greatly affect the results.

3.2.1.1. Fire Indices Application Steps

Cloud and Water Masking

In order to minimize classification errors in fire study areas and to obtain accurate Fire indices results, cloud and water masking operations were performed on the images. The effects of the atmosphere should also be taken into account when determining the appropriate ground reflectance value for satellite imagery [26]. These operations were performed with the help of Snap 7.0 application. In order to perform cloud masking in pre-fire and post-fire images, scl_cloud_medium_proba, scl_cloud_high_proba, scl_thin_cirrus cloud mask bands from Sentinel 2 band data were collected using the BandMath operator with the Snap 7.0 application, and a new cloud mask was created by specifying areas with pixel values less than 255 as black and pixel points greater than 255 as white in the new image band of the collection.

In the new band created separately for the pre-fire and post-fire images, the image areas containing clouds were defined as white and the other areas were defined as black. Normalized Difference Water Index (NDWI) was used to mask the water areas in the images.

After finding the water areas for the pre- and post-fire images, a new band named "water_mask" was created. The water_mask band was then combined with the cloud masks to create a new band named "cloud_water_mask".

This band of cloud and water masks was subtracted from the new image while finding the dNBR index.

Image Preprocessing

The resolution of the thirteen bands that make up the Sentinel-2 products is not the same everywhere. Since many operators do not accept data with bands of different sizes, the first step for us is to resample the bands so that they have the same resolution level. In the sampling process, using the "Resample" operator with the Snap 7.0 application, the images of the study areas were resampled to a resolution of 10 meters using the bilinear sampling method according to B2 at a resolution of 10 meters.

In the second step, the "Subset" operator was used again with the Snap application to cut the previously selected study areas according to a geographic coordinate polygon and by selecting the bands to be used. This operator is used in the process of segmenting a data product along spatial or spectral dimensions. Subsets of the area can be specified by pixel coordinates or a geographic polygon.

During this sampling process, bands B3, B4, B6, B7, B8, B8A, B12, cloud_mask and water_cloud_mask were selected and cut according to a polygon with geographic coordinates created for the study area.

Fire Index Calculations

Normalized burn rate (NBR) is the most widely used statistic for burn area and burn severity mapping produced from satellite data. In our study, in the first step, NBR and dNBR index values were calculated using pre-fire and post-fire satellite images for fire zone study areas and fire areas were identified and located.

In the second step, the BAIS2 and dBAIS2 indices, called the Burned Area Index for Sentinel-2 developed by Filippini, were calculated for the images of the study areas and fire zones were identified

3.2.2. Deep Learning Implementation Steps

3.2.2.1. Image Pre-Processing

Post-fire satellite images of the fire zones study areas were resampled according to the B2 Band with a resolution of 10 m with the help of snap 7.0 application. For this sampling process, all bands were selected using the "Resample" operator. Unlike the fire index calculations, only the post-fire satellite image was used. In the next step, using the subset operator, the regions previously selected as the study area were cut by selecting all bands (B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B8A, B9, B11 and B12) according to the polygons with geographic coordinates.

3.2.2.2. Creation of Deep Learning Data Set

In the process of creating the data set for the deep learning model, burnt and unburnt areas were determined by selecting the areas affected by the fire and the areas not damaged by the fire with geographical coordinate polygons with the help of the Snap 7.0 application. The pixels selected with polygons were then cut using the subset operator with the Snap 7.0 application and converted to data in tiff format. Selected areas are clearly seen in Figure 3 500 geographically coordinated polygons from burned areas and 300 from unburned areas were cut and prepared for the data set. The selection of pixels in the data set was made precisely to prevent classification errors.

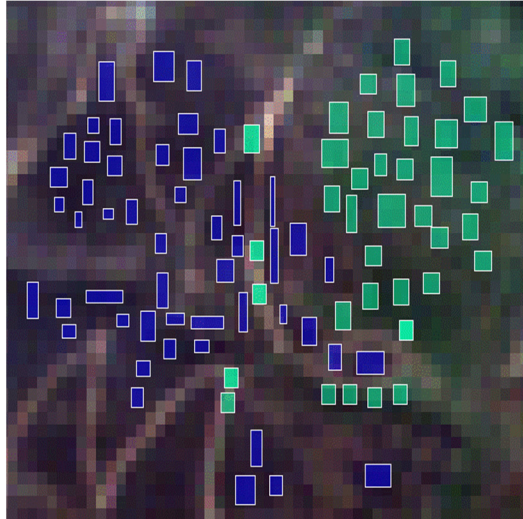


Figure 3. Selection of burnt and unburnt areas

3.2.2.3. Creating a Deep Learning Model

The deep learning model was coded in Python programming language using TensorFlow and Keras libraries with Spyder 5.0 application on Anaconda application platform. While creating the deep learning model, we tried to create a model that we can use the data in our study in the most efficient way. The deep neural network model we created is input layer with 12 nodes, 5 hidden layers with 12 nodes per layer and output layer consists of a node. In our model, the data of the satellite image Since 12 bands were resampled after image preprocessing, nodes representing all bands were created in the input layer. Figure 4 shows the model in detail. In the deep learning model, Relu function was used in the hidden layers and sigmoid function was used as activation function in the output layer.

Adam (Adaptive Moment Estimation) optimization was used as the optimization algorithm due to its success and ease of application in updating the weights when working with large data and parameters in deep learning. MSE (Mean Squared Error) was used as the loss function for the losses in the deep learning model.

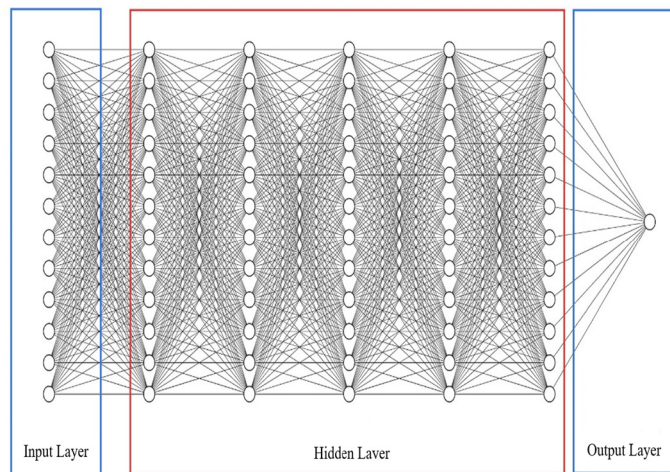


Figure 4. Deep learning model

3.2.3. Training and Testing a Deep Learning Model

For training, the images in the previously created dataset were processed using TensorFlow and Keras libraries in the Python programming language and then fed into the deep learning model. The maximum

number of training epochs was set to 300 as the most suitable for our model; however, this value may vary depending on the model architecture and dataset.

To prevent overfitting, an early stopping mechanism was implemented in Python, ensuring that training halts when performance stabilizes. Overfitting can negatively impact model performance by reducing its generalization ability. The dataset was split into 70% for training and 30% for testing to evaluate the model effectively. During testing, the trained model was loaded and tested using a Python-based program, utilizing TensorFlow and Keras libraries once again.

The model's training performance is visualized in Figure 5 and Figure 6. Figure 5 presents the accuracy graph, demonstrating the model's ability to classify burned and unburned pixels. The accuracy improves rapidly in the initial epochs and gradually stabilizes near 1.0, indicating successful learning. Figure 6 depicts the loss graph, representing the pixel-wise classification error between predicted and actual burned/unburned areas. The decreasing loss values over epochs suggest that the model effectively minimizes classification errors. The 'Loss' curve corresponds to the training dataset, while 'val_loss' represents the validation dataset. Together, these figures confirm the model's convergence and effectiveness in distinguishing burned regions.

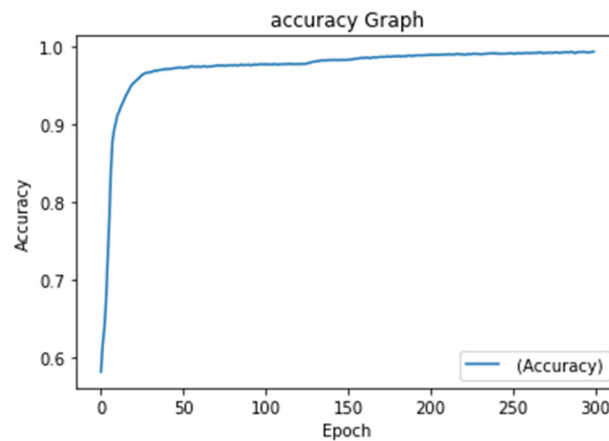


Figure 5. Accuracy graph for the training process showing model performance over 300 epochs

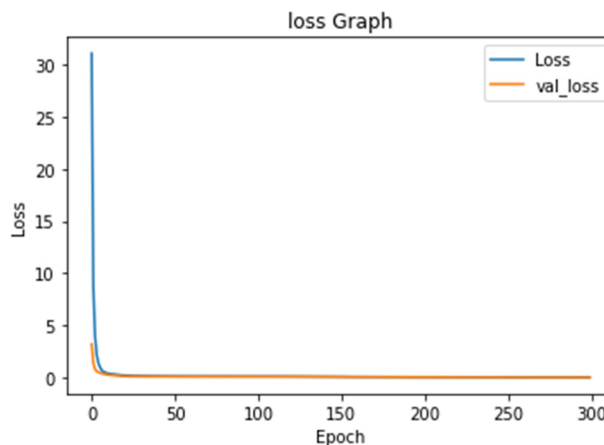


Figure 6 Loss graph for the training process showing model performance over 300 epochs. The loss represents the pixel-wise classification error between the predicted and actual burned/unburned areas, indicating the model's accuracy in distinguishing between these classes

3.2.4. Comparison of Deep Learning and Fire Indices with General Directorate of Forestry Data

In the last step of the study, the deep learning and fire index data were compared with the data in the fire registration slips obtained from the General Directorate of Forestry. The General Directorate of Forestry data was taken as the success criterion. The results of GDF data, fire indices and deep learning method were

evaluated according to their proportional overlap rates. In addition, the data found with ArcGIS PRO 2.7 application were converted into GeoTiff format and mapped spatially on the hybrid map and visually evaluated. Areas outside the fire zones and misclassifications were observed again on the map and their success was evaluated.

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1. Fire Indexes and Deep Learning Model Results: Samandağ Fire Findings

The images of the study areas were processed according to the dates of occurrence of the fires and fire indices were applied, and then the burned areas were detected with the newly created deep artificial neural network model.

4.1.1. dNBR

The NBR and dNBR indices were first applied for the Samandağ fire, as shown in figure 7. Cloud and water masking were applied to avoid affecting the results of the fire indices.

In the first step, the NBR index was applied on the pre-fire image and then applied on the post-fire image. As a result of these processes, two new bands named NBR (Before Fire) and NBR (After Fire) were formed. The dNBR value was calculated via the new bands and according to the burn severity in the Samandağ study area, the amount of high post-fire regeneration was 14.20 hectares, low post-fire regeneration was 41.85 hectares, unburned area was 9638.20, low burn severity was 789.90 hectares, medium/low burn severity was 582.10 hectares, medium/high burning intensity was found to be 687.30 hectares and high burning intensity was found to be 1880.40 hectares. dNBR results are given in Table 2.

Additionally, Figure 8 provides a detailed visualization of the dNBR index, illustrating the spatial distribution of burn severity (low, moderate/low, and high), helping to assess fire impact.

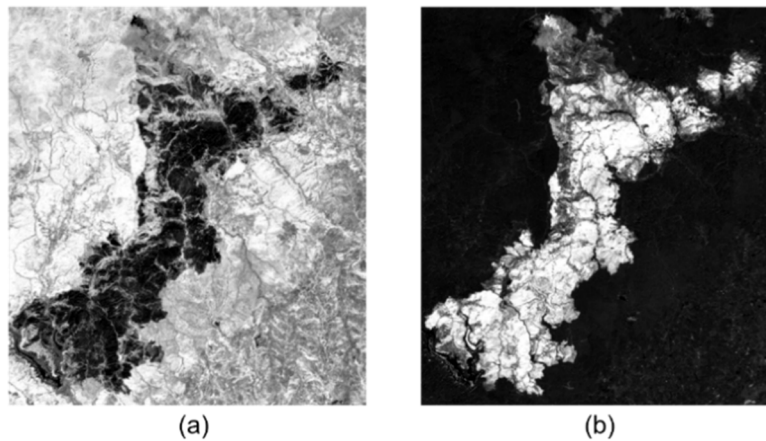


Figure 7. Samandağ study area a) NBR index b) dNBR index result

Table 2. Samandağ forest fire dNBR index results

Result	dNBR (hectare)
Enchanced regrowth,high(post-fire)	14.20
Enchanced regrowth,low(post-fire)	41.85
Unburned	9638.20
Low severity	789.90
Moderate/Low severity	582.10
Moderate/High severity	687.30
High severity	1880.40

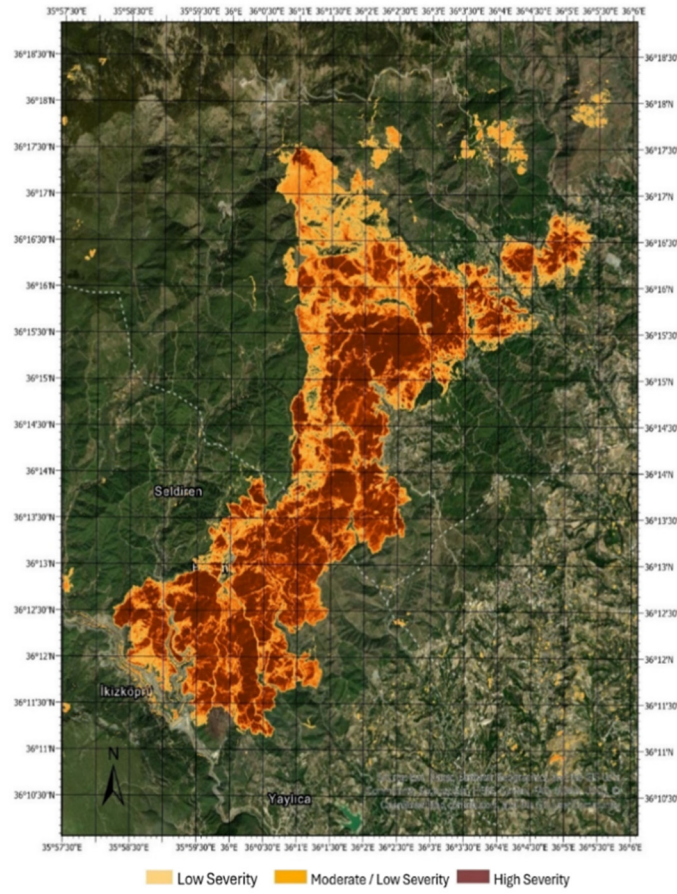


Figure 8. Samandağ study areas DNBR detailed index result

4.1.2. dBAIS2

Calculations for our other fire area identification indices, BAIS2 and dBAIS2, were also performed on pre- and post-fire images, as shown in Figure 9. These calculations generated the BAIS2 (Before Fire) and BAIS2 (After Fire) bands, from which the dBAIS2 index was derived to determine the burned area.

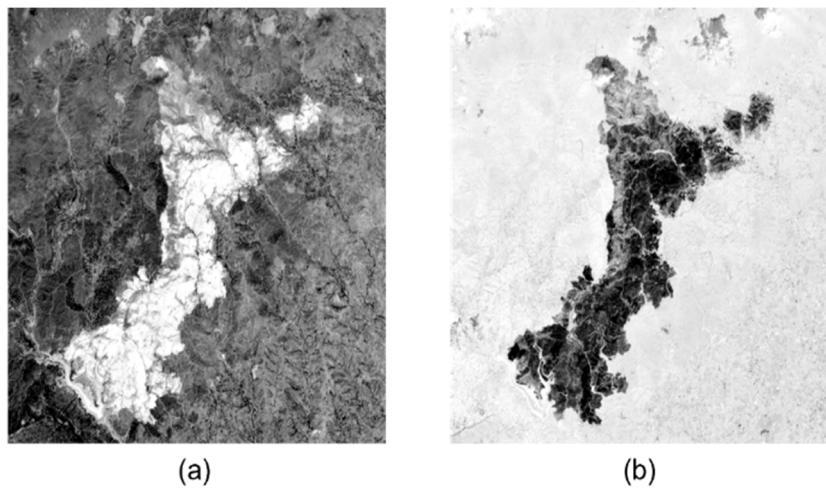


Figure 9. Samandağ study area a) BAIS2 index b) dBAIS2 index result

Figure 10 provides a geographic representation of the burned area, highlighting the extent of fire damage for clearer assessment. According to the dBAIS2 index, a total of 3528.60 hectares of burned land was identified in the Samandağ study area.

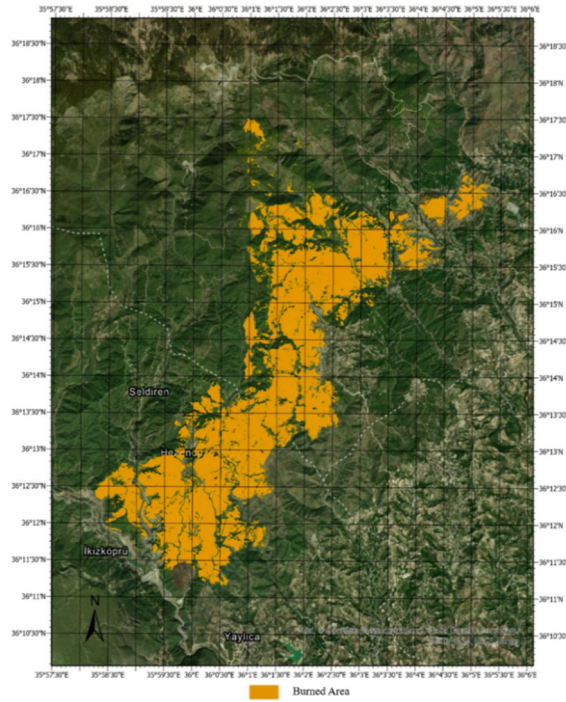


Figure 10. Samandağ study areas detailed dBAIS2 index result

4.1.3. Our Deep Learning Model

With the new deep learning model designed, the image of the study area was classified as burned and unburned areas using the training dataset created with only post-fire data from the Samandağ study area, as shown in Figure 11. The accuracy rate of the new model was found to be 98.36%. According to the results found with the deep learning method, 3605.15 hectares of burned area was identified in the Samandağ study area.

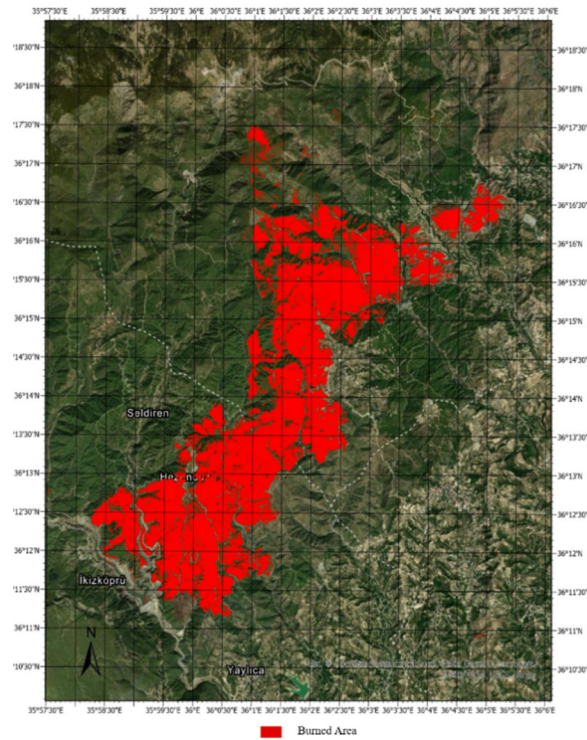


Figure 11. Samandağ region our deep learning model result

For the Samandağ study area forest fire, the dNBR index is 3939.70 hectares, the dBAIS2 index is 3528.60 hectares and 3605.15 hectares of burnt forest area is calculated with the deep learning model. When we look at these values, considering the GDF (General Directorate of Forestry) data, which is 3664.9, as a criterion, dNBR index calculated 274.80 hectares more burned area, dBAIS2 index calculated 136.3 hectares less burned area and deep learning data calculated 59.75 hectares less burned forest area when compared with GDF data. The study area is quite large compared to ordinary fires. dNBR index overlaps 91.50%, dBAIS2 index overlaps 96.28%, deep learning model overlaps 98.36%. According to these values, the fact that the deep learning model finds values closer to the GDF data shows that it provides more consistent and accurate estimates than other indices.

As summarized in Table 3, these values indicate that the deep learning model provides more consistent and accurate estimates compared to other indices.

Table 2. Samandağ fire district burning rates

	Samandağ forest fire			General directorate of forestry (GDF) data
	dNBR index	dBAIS2 index	Deep learning model	
Burnt area (Hectare)	3939.70	3528.60	3605.15	3664.9

5. CONCLUSION AND SUGGESTIONS

In this study, a new deep learning model was compared with conventional burned area indices (dNBR and dBAIS2) to detect forest fire damage in Hatay's Samandağ region using Sentinel-2 satellite data. The findings demonstrated that the deep learning approach yielded a higher accuracy rate, with a near 98.36% match against the General Directorate of Forestry (GDF) records, surpassing the dNBR and dBAIS2 indices. These results highlight the capacity of deep learning algorithms to more effectively capture and distinguish complex spectral signatures in burned and unburned surfaces, particularly when integrated with Sentinel-2's fine spatial and temporal resolution. By leveraging information from multiple bands, the deep learning model mitigated classification errors more robustly than traditional index-based methods.

The improved accuracy and reliability of the deep learning method bear significant implications for disaster response and forest management. Rapid and accurate assessment of burned areas is critical in devising immediate remediation strategies, guiding reforestation efforts, and optimizing resource allocation during wildfire emergencies. Moreover, the temporal proximity of satellite acquisitions to fire events was crucial in reducing observational gaps; thus, integrating real-time or near-real-time data from drones and ground sensors could further strengthen early detection and damage quantification. Expanding the model's training datasets with diverse geographical regions and vegetation types would also enhance its generalizability. Incorporating a wider range of advanced machine learning architectures, such as convolutional neural networks (CNNs) or attention-based models, could provide even more detailed classifications of burn severity levels and expedite post-fire recovery planning. Consequently, this study underscores the growing importance of deep learning techniques in wildfire monitoring, emphasizing their role in developing more responsive and data-driven forest management policies.

6. REFERENCES

1. Sabuncu, A. & Özener, H.A. (2019). Uzaktan algılama teknikleri ile yanmış alanların tespiti: İzmir Seferihisar orman yangını örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 90, 1-9.
2. Özhatay, F., Kültür, Ş. & Gürdal Abamor, B. (2022). Check-list of additional taxa to the supplement of flora of Turkey X. *İstanbul Journal of Pharmacy*, 52, 227-250.
3. Rulli, M.C. & Rosso, R. (2007). Hydrologic response of upland catchments to wildfires. *Advances in Water Resources*, 30, 2072-2086.
4. Fidanboy, M., Adar, N. & Okyay, S. (2022). Derin öğrenmeye dayalı orman yangını tahmin modeli geliştirilmesi ve Türkiye yangın risk haritasının oluşturulması. *Orman Araştırma Dergisi*, 9, 206-218.
5. Sunar, O.N. & Kurnaz, S. (2022). Afet yönetimi bağlamında havacılığın orman yangınlarıyla mücadeledeki rolü üzerine bir değerlendirme. *International Journal of Aeronautics and Astronautics*, 3, 60-70.

6. Adegun, A.A., Viriri, S. & Tapamo, J.R. (2023). Review of deep learning methods for remote sensing satellite images classification: Experimental survey and comparative analysis. *Journal of Big Data*, 10, 93.
7. Chen, X., Zhang, Y., Wang, S., Zhao, Z., Liu, C. & Wen, J. (2024). Comparative study of machine learning methods for mapping forest fire areas using Sentinel-1B and 2A imagery. *Frontiers in Remote Sensing*, 5, 1446641.
8. Chuvieco, E., Martín, M.P. & Palacios, A. (2002). Assessment of different spectral indices in the red–near-infrared spectral domain for burned land discrimination. *International Journal of Remote Sensing*, 23, 5103-5110.
9. Key, C.H. & Benson, N.C. (1999). Measuring and remote sensing of burn severity: The CBI and NBR. In *Proceedings of the Joint Fire Science Conference and Workshop (Vol. II)*, 2, 284.
10. Miller, J.D. & Thode, A.E. (2007). Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta normalized burn ratio (dNBR). *Remote Sensing of Environment*, 109, 66-80.
11. Filipponi, F. (2018). BAIS2: Burned area index for Sentinel-2. In *2nd International Electronic Conference on Remote Sensing*, 364.
12. Mpakairi, K.S., Kadzunge, S.L. & Ndaimani, H. (2020). Testing the utility of the blue spectral region in burned area mapping: Insights from savanna wildfires. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 20, 100365.
13. Tanase, M.A., Belenguer-Plomer, M.A., Roteta, E., Bastarrika, A., Wheeler, J., Fernández-Carrillo, Á. et al. (2020). Burned area detection and mapping: Intercomparison of Sentinel-1 and Sentinel-2 based algorithms over tropical Africa. *Remote Sensing*, 12, 334.
14. Llorens, R., Sobrino, J.A., Fernández, C., Fernández-Alonso, J.M. & Vega, J.A. (2021). A methodology to estimate forest fires burned areas and burn severity degrees using Sentinel-2 data. Application to the October 2017 fires in the Iberian Peninsula. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 95, 102243.
15. Wang, S., Baig, M.H.A., Liu, S., Wan, H., Wu, T. & Yang, Y. (2018). Estimating the area burned by agricultural fires from Landsat 8 data using the vegetation difference index and burn scar index. *International Journal of Wildland Fire*, 27, 217.
16. Ramo, R., García, M., Rodríguez, D. & Chuvieco, E. (2018). A data mining approach for global burned area mapping. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73, 39-51.
17. Arıkan, C., Tümer, İ.N., Aksoy, S. & Sertel, E. (2022). Determination of burned areas using Sentinel-2A imagery and machine learning classification algorithms. *2022 4th Intercontinental Geoinformation Days (IGD)*, Tabriz, 43-46.
18. Seydi, S.T., Hasanlou, M. & Chanussot, J. (2021). DSMNN-net: A deep siamese morphological neural network model for burned area mapping using multispectral Sentinel-2 and hyperspectral PRISMA images. *Remote Sensing*, 13, 5138.
19. Belenguer-Plomer, M.A., Tanase, M.A., Chuvieco, E. & Bovolo, F. (2021). CNN-based burned area mapping using radar and optical data. *Remote Sensing of Environment*, 260, 112468.
20. Knopp, L., Wieland, M., Rättich, M. & Martinis, S. (2020). A deep learning approach for burned area segmentation with Sentinel-2 data. *Remote Sensing*, 12, 2422.
21. Arruda, V.L.S., Piontekowski, V.J., Alencar, A., Pereira, R.S. & Matricardi, E.A.T. (2021). An alternative approach for mapping burn scars using Landsat imagery, Google Earth Engine, and deep learning in the Brazilian savanna. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 22, 100472.
22. Hu, X., Ban, Y. & Nascetti, A. (2021). Uni-temporal multispectral imagery for burned area mapping with deep learning. *Remote Sensing*, 13, 1509.
23. Ghali, R. & Akhloufi, M.A. (2023). Deep learning approaches for wildland fires using satellite remote sensing data: Detection, mapping, and prediction. *Fire*, 6, 192.
24. Sathishkumar, V.E., Cho, J., Subramanian, M. & Naren, O.S. (2023). Forest fire and smoke detection using deep learning-based learning without forgetting. *Fire Ecology*, 19, 9.
25. Cocke, A.E., Fulé, P.Z. & Crouse, J.E. (2005). Comparison of burn severity assessments using differenced normalized burn ratio and ground data. *International Journal of Wildland Fire*, 14, 189-198.
26. Roy, D.P., Huang, H., Boschetti, L., Giglio, L., Yan, L., Zhang, H.H. et al. (2019). Landsat-8 and Sentinel-2 burned area mapping – A combined sensor multi-temporal change detection approach. *Remote Sensing of Environment*, 231, 111254.

27. Key, C.H. & Benson, N.C. (2006). Landscape assessment (LA) sampling and analysis methods. *USDA Forest Service – General Technical Report RMRS-GTR*.
28. Lutes, D.C., Keane, R.E., Caratti, J.F., Key, C.H., Benson, N.C., Sutherland, S. et al. (2006). FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system. *Gen. Tech. Rep. USDA Forest Service, RMRS-GTR-164-CD*, 1-55.
29. Han, A., Qing, S., Bao, Y., Na, L., Bao, Y., Liu, X. et al. (2021). Short-term effects of fire severity on vegetation based on Sentinel-2 satellite data. *Sustainability*, 13, 432.
30. McFeeters, S.K. (1996). The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 1425-1432.
31. Fisher, A., Flood, N. & Danaher, T. (2016). Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia. *Remote Sensing of Environment*, 175, 167-182.
32. Fernández-García, V., Beltrán-Marcos, D., Fernández-Guisuraga, J.M., Marcos, E. & Calvo, L. (2022). Predicting potential wildfire severity across southern Europe with global data sources. *Science of the Total Environment*, 829, 154729.
33. Zhang, T., Su, J., Liu, C., Chen, W.H., Liu, H. & Liu, G. (2017). Band selection in Sentinel-2 satellite for agriculture applications. *2017 23rd International Conference on Automation and Computing (ICAC)*, Huddersfield, 1-6.

Improving of Thixotropic Properties of Bentonite Dispersions in Rheological Applications

Onur Eser KÖK^{1,a}, Hüseyin VAPUR^{2,b}, Yasin ERDOĞAN^{3,c}

¹İskenderun Technical University, Department of Petroleum and Natural Gas Engineering, Hatay, Türkiye

²Cukurova University, Department of Mining Engineering, Adana, Türkiye

³Republic of Turkey, Ministry of Energy and Natural Resources, Ankara, Türkiye

^aORCID: 0000-0002-7061-2921; ^bORCID: 0000-0003-4438-3982; ^cORCID: 0000-0002-2314-5216

Article Info

Received : 03.09.2024

Accepted : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665824

Corresponding Author

Onur Eser KÖK

oeser.kok@iste.edu.tr

Keywords

Bentonite

Activation

Shear stress

Viscosity

Rheological modelling

How to cite: KÖK, O.E., VAPUR, H., ERDOĞAN, Y., (2025). Improving of Thixotropic Properties of Bentonite Dispersions in Rheological Applications. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(1), 49-60.

ABSTRACT

In this study, the improvement of the rheological properties of bentonites by alkaline activation was investigated. The characterizations of the samples used in the study were determined by X-ray fluorescence spectroscopy (XRF), particle size distribution (PSD), cation exchange capacity (CEC), specific surface area (SSA) analysis and scanning electron microscopy (SEM) images. The rheological properties of the suspensions were determined by apparent viscosity (AV), plastic viscosity (PV), yield point (YP) and gel strength (GS) measurements. In addition, static filtration analysis was performed and thixotropic properties were determined by shear thinning index (STI) and thixotropy index (TI) calculations. Rheological flow parameters were calculated using the least squares method (LSM) and the model equations were created according to the Herschel-Bulkley flow model (HBM). As a result of the analyzes, it was determined that the alkaline activation process improved the rheological and thixotropic properties of bentonite dispersions. Also, the rheogram curves indicate that the suspensions showed a shear-thinning flow behavior. In the HBM evaluation, it was determined that the best flow properties belonged to EB (0.9987 R²) in raw samples and NB (0.9985 R²) in activated samples.

Reolojik Uygulamalarda Bentonit Dispersiyonlarının Tiksotropik Özelliklerinin İyileştirilmesi

Makale Bilgileri

Geliş : 03.09.2024

Kabul : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665824

Sorumlu Yazar

Onur Eser KÖK

oeser.kok@iste.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Bentonit

Aktivasyon

Kayma gerilmesi

Viskozite

Reolojik modelleme

Atf şekli: KÖK, O.E., VAPUR, H., ERDOĞAN, Y., (2025). Reolojik Uygulamalarda Bentonit Dispersiyonlarının Tiksotropik Özelliklerinin İyileştirilmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(1), 49-60.

ÖZ

Bu çalışmada, bentonitlerin reolojik özelliklerinin alkali aktivasyonla iyileştirilmesi araştırılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan numunelerin karakterizasyonları X-ışını floresans spektroskopisi (XRF), tanecik boyut dağılımı (PSD), kation değişim kapasitesi (CEC), spesifik yüzey alanı (SSA) analizleri ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri ile belirlenmiştir. Süspansiyonların reolojik özellikleri görünür viskozite (AV), plastik viskozite (PV), kopma noktası (YP) ve jel kuvveti (GS) ölçümleri ile belirlenmiştir. Ayrıca statik filtrasyon analizi yapılmış olup, tiksotropik özellikleri kayma incelme indeksi (STI) ve tiksotropi indeksi (TI) hesaplamaları ile belirlenmiştir. Reolojik akış parametreleri en küçük kareler yöntemi (EKK) kullanılarak hesaplanmış olup, model denklemleri Herschel-Bulkley akış modeline (HBM) göre oluşturulmuştur. Yapılan analizler sonucunda alkali aktivasyon işleminin bentonit dispersiyonlarının reolojik ve tiksotropik özelliklerini iyileştirdiği belirlenmiştir. Ayrıca, reogram eğrileri süspansiyonların kayma incelme davranışı gösteren bir akış gösterdiğini ifade etmektedir. HBM reolojik model değerlendirmesinde en iyi akış özelliklerinin ham numunelerde EB kodlu numuneye (0,9987 R²), aktivasyonlu numunelerde ise NB kodlu numuneye (0,9985 R²) ait olduğu belirlenmiştir.

1. INTRODUCTION

Bentonites that member of smectite type clay minerals come front among the others due to can shows gel-form at low concentrations [1-4]. They vary differ types according to dominant ions in contain as sodium, calcium and mix types. Each of them shows differ gel function and swelling mechanism. Thus, they do not always show the same properties [5-7]. Each type bentonites are preferred according to differ usage areas considering the general properties. Sodium type ones are widely used because of they can occure more viscous suspensions than others. For this reason, the conversion studies of calcium and mix types to sodium type continues from past to present. Considering the suspension properties, bentonites are more preferred and used especially in drilling operations than others [8-11].

Bentonites used as a major additive material in drilling operations due to swelling and thixotropy (TP) properties [12]. Although there are many drilling fluid systems, water-based is the most widely used [13]. It has a significant cost effect (~15-20%) on the drilling cost and has important duties for well such as removing the cuttings from bottom to surface, cooling bit, provide stability, controlling formation pressure, preventing corrosion and suspending cuttings [14,15]. In drilling, drilling fluid must have some flow properties to perform tasks because of differences in well and surface (pressure, temperature, rock properties of drilled). With these properties, rheology of drilling fluid is controlled. To controlling rheology of drilling fluid, some materials (chemicals, organics, and polymers) is added into system [16]. However, these materials increase the drilling cost. Therefore, the bentonite added drilling fluids comes to the fore in controlling the flow properties of drilling mud because it is cheap and has abundant reserves. However, the specifications of bentonite used are also important in controlling drilling fluid rheology. Bentonites, has high swelling capacity and low filtrate volume, should be preferred. Thus, more viscous drilling fluid can be obtained. Therefore, either bentonite with good properties should be used or the rheological properties of bentonite should be improved [17].

In this study, the rheological and thixotropic properties of raw and activated bentonites were investigated. Flow properties of the muds like apparent viscosity (AV), plastic viscosity (PV), yield point (YP), gel strength (GS) (10 sec. and 10 min) and filtration were evaluated. Then, usability of bentonites was determined as drilling fluid additive. Also, shear stress (SS) values of the muds at different shear rates (SR) were measured with rotational viscometer and investigated according to Herschel-Bulkley (HB) rheological model according to least squared method (LSM) with MatLab.

2. MATERIAL AND METHOD

The bentonite samples that were used the experiments were collected different region and companies. WB was taken from HALLIBURTON, EB and RB were taken from CANBENSAN, NB was taken from RBS and UB was taken from BENTAS.

The activation process was applied using with sodium carbonate (Na_2CO_3) and magnesium oxide (MgO) according to dry alkaline method [18]. This activation method was applied to the concentrated bentonites, which are obtained from grinding the WB, EB, RB, NB and UB and sieved under 150 μm particle size. Then, drying process was applied under at 105 $^\circ\text{C}$ and 120 min. conditions so that remove the free water molecules. After this process, bentonite samples were cooled and were taken into mixing machine and deionized water sprayed (min. 15 minutes) until humidity reached at 40% when mixing continued. Then, Na_2CO_3 was added the ratio of wt.2.5% to the samples, which been the form like dense paste, and mixing was applied for 15-20 minutes so that homogenization. They were turned into round pieces with a diameter of 4-5 cm for the drying and holding process to be efficient and kept for 8-9 weeks for the exchange of Na^+ cations. Afterwards, the grinding was made using with planetary ball mill. As a result of the grinding, the micronize particle sized samples were sieved to be lower than 75 μm . After the sieving MgO was added as ratio of 0.5 wt% with dry mixing. The activation was completed as a result of these steps.

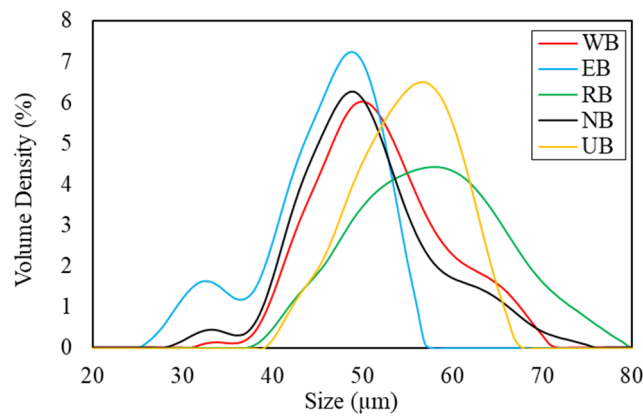
The chemical compositions of the bentonite samples were detected X-ray fluorescence (XRF) analysis with MINIPAL 4 and results obtained from Kk et al. [19] (see Table 1). The particle size distribution (PSD) of samples were analysed by Malvern Panalytical Mastersizer 3000 and results given in Figure 1. Here, the samples were grinding with a laboratory scale ball mill. The particle size distribution of bentonites (see Table 2) were provided to be compatible with API 13A standard ($d_{90} < 75 \mu\text{m}$) [20].

Table 1. Chemical analysis of bentonites

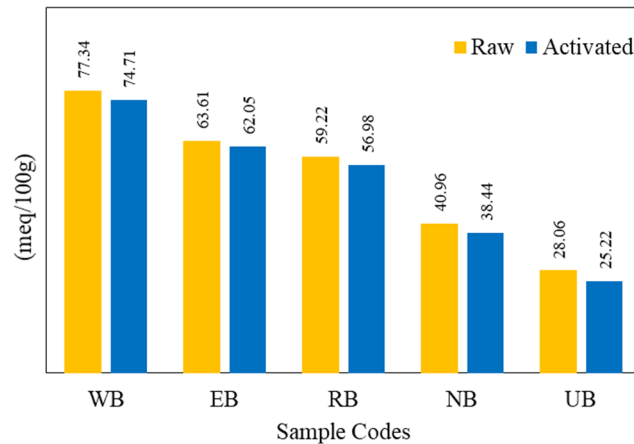
Raw Samples	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	MR
WB	64.27	15.51	5.62	1.12	0.52	0.03	2.79	0.24	2.88
EB	56.71	16.27	7.12	5.35	1.42	0.17	1.59	0.67	0.55
RB	52.13	14.34	11.20	5.11	1.76	0.23	2.82	1.69	0.86
NB	52.84	14.44	9.70	6.43	1.20	0.16	1.93	1.42	0.48
UB	65.69	16.37	1.09	4.91	0.49	0.04	0.91	0.18	0.28
Activated Samples	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	MR
WB	65.98	16.31	5.57	1.1	0.61	0.11	2.99	0.34	2.97
EB	58.84	15.67	7.53	4.33	2.01	0.21	2.85	0.81	1.07
RB	52.71	15.40	10.98	4.04	1.97	0.37	3.17	1.69	1.17
NB	56.44	13.51	9.67	3.91	1.55	0.21	3.69	1.12	1.27
UB	63.79	14.53	1.77	4.00	1.19	0.11	2.99	0.56	1.02

Table 2. PSD of the raw bentonites

Sample	d ₁₀	d ₅₀ (μ m)	d ₉₀
WB	2.36	6.49	26.5
EB	0.81	3.65	7.91
RB	3.66	14.4	60.0
NB	1.99	5.34	24.2
UB	3.73	10.7	25.8

**Figure 1.** Particle size distribution of bentonite samples

The cation exchange capacity (CEC) of the samples were calculated using methylene blue solution according to API 13I standard [21] and given in Figure 2.

**Figure 2.** CEC values of the bentonites

The specific surface area (SSA) of the samples were determined with Brunauer-Emmett-Teller (BET) analysis using N₂ adsorption-desorption measurements by Costech Sorptometer 1042 and results given in Figure 3.

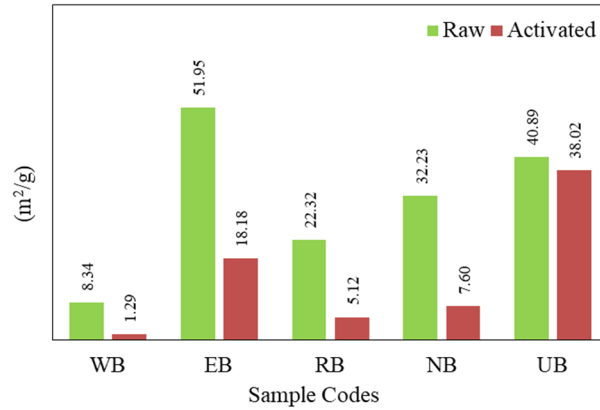


Figure 3. SSA values of bentonites

The scanning electron microscope (SEM) images of the samples were obtained with using Quanta FEG 650 scanning electron microscope for morphological evaluations. The images of raw and activated bentonites were shown in Figure 4 and Figure 5, respectively.

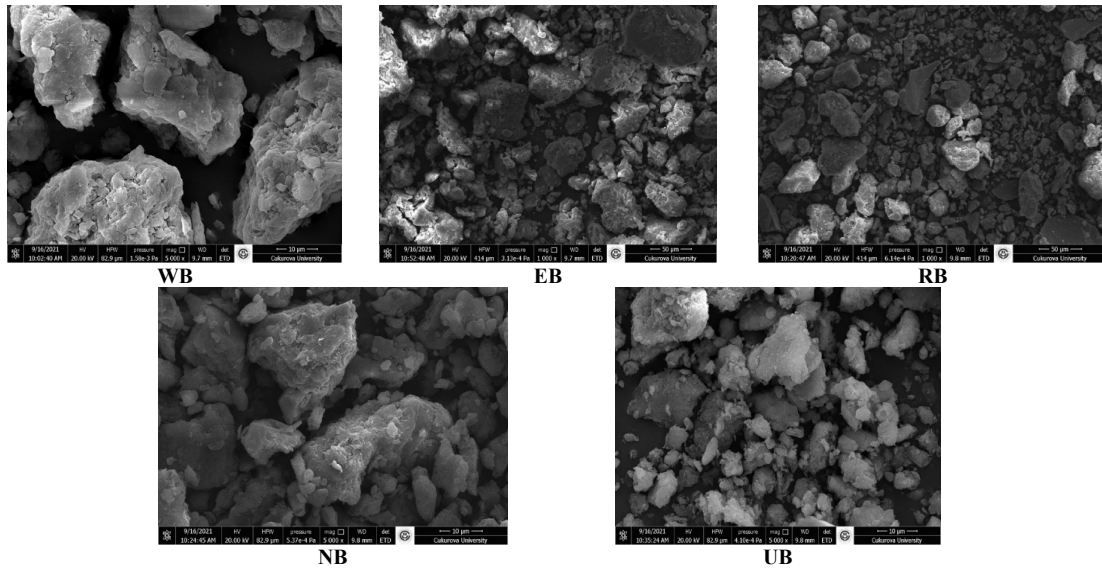


Figure 4. SEM images of the raw bentonites

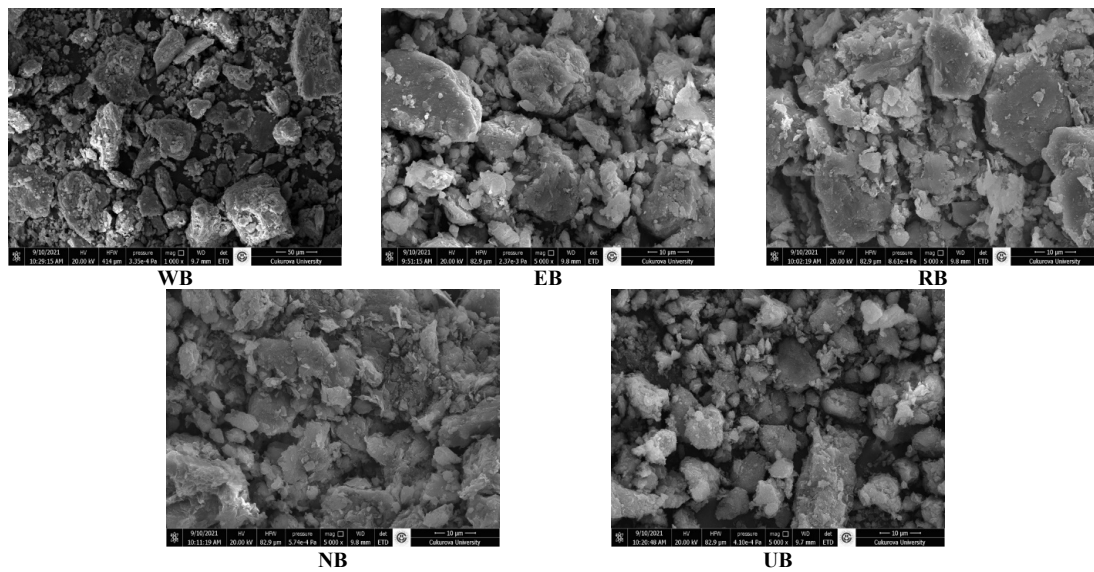


Figure 5. SEM images of the activated bentonites

The drilling mud samples were prepared using wt. 6% suspension ratio according to API 13A standard. In addition, the pH of all samples was be ensured range between 7.7-8.5.

Rheological properties of the muds were determined with a rotational viscometer (OFITE Model 800) by considering SS, PV, YP and AV. The viscometer equipped with six speeds as 600, 300, 200, 100, 60, 30, 6 and 3 (rpm). After reading and recording the values, Equations 6-7 were applied.

The PV and YP are determined in a concentric cylinder rotary viscometer as high accuracy. The essential elements of viscometers are rotor and bob, and in this study, R1-B1 rotor-bob system was used. As a work system, an outer cup rotates concentrically around an inner cylinder or bob, that is suspended from a torsion wire. A dial affixed and a pointer are used to measure the angle at which the wire rotates. When the cup is rotated, the bob rotates together with up to the torque in the wire creates a SS at the bob surface higher than the shear strength of the plastic structure [22]. And definition equation is given below.

$$\frac{T_0}{2\pi R_b^2 h} = \tau_0 \quad (1)$$

T_0 : torque at the yield point; R_b : bob radius; h : bob's effective height

The yield point (τ_0) is defined with the intercept. Also, T_2 , is the extrapolation of the curve linear portion on the torque axis. It is given with above equation in condition that $\omega=0$. Then;

$$\frac{T_2}{4\pi h} \left(\frac{1}{R_b^2} + \frac{1}{R_c^2} \right) = \tau_0 \ln \frac{R_c}{R_b} \quad (2)$$

There are a many commercially available and suitable viscometer. Some of them can be used for drilling muds and they are similar in work principle. All are based on a design by Savins and Roper [23], which enables the plastic viscosity (PV) and yield point (YP) to be calculated from 600 and 300 rpm. The underlying theory is as follows:

$$\mu_p = \frac{A\theta - B\tau_0}{\omega} \quad (3)$$

where A: spring constant; B: conversion factor; ω : rotor speed (rpm)

Then,

$$\mu_p = PV = A \left(\frac{\theta_1 - \theta_2}{\omega_1 - \omega_2} \right) \quad (4)$$

θ_1 : dial reading at ω_1 rpm; θ_2 : dial reading at ω_2 rpm; PV: plastic viscosity

$$\tau_0 = YP = \frac{A}{B} \left[\theta_1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_1 - \omega_2} \right) (\theta_1 - \theta_2) \right] \quad (5)$$

θ_1 : dial reading at ω_1 rpm; θ_2 : dial reading at ω_2 rpm; PV: plastic viscosity; YP: yield point.

Then,

Equations 4 and 5 then simplify to;

$$PV = \theta_1 - \theta_2 \quad (6)$$

$$YP = \theta_2 - PV \quad (7)$$

To provide these parameters, R_b and R_c were chosen so that, with an annulus width of about 1mm, the value of $A=B$ would be 300, ω_2 was therefore 300 rpm, and ω_1 , 600 rpm. Then, the specifications enabled Equation 6 to give the PV (cP), and Equation 7 to give the YP (lb/100ft²). In addition, Equation 8 to give the apparent viscosity (AV) in centipoise (cP).

$$AV = \frac{300 \times \theta_{600}}{600} = \frac{\theta_{600}}{2} \quad (8)$$

GS of the muds were measured by reading maximum dial reading at 3 rpm for at 10 sec. and 10 min. with rotational viscometer. Before each measurement, the muds were stirred for dispersion (min. 10 sec. at 600 rpm).

Filtration properties of the muds were determined with fluid loss test by using API filter press test kit under 100 ± 5 PSI nitrogen pressure for 30 min. at room temperature.

TP properties of the muds were determined according to the shear thinning index (STI) and thixotropy index (TI) given in Equations 9-10.

$$STI = \frac{\theta_3}{\theta_{300}} \quad (9)$$

$$TI = \frac{\theta_{600min}}{\theta_{600max}} \quad (10)$$

Rheograms of the muds were determined according to SS values at different SR. Also, the rheological parameter estimations were performed according to HB model given in Eq. 11. Model parameters were determined using least squares method of Matlab™ and the coefficient of determination (R) indicator.

$$\tau = \tau_y + k\gamma^n \quad (11)$$

Where, τ and γ are the SS and SR, respectively. Others are rheological parameters of the model.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Characterization Results

Mass ratio (MR) values were calculated using the XRF results by $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} / \text{CaO} + \text{MgO}$ equation (Na-Ben: $\text{MR} > 1$, Na/Ca-Ben: $0.35 < \text{MR} < 1$, Ca-Ben: $\text{MR} < 0.35$). Results showed that WB is Na-Ben, EB, RB and NB are Na/Ca-Ben and UB is Ca-Ben in raw samples. However, all samples were determined as Na-Ben after the activation.

The PSD results showed that all sampled were provided to API standarts ($d_{90} < 75 \mu\text{m}$). Also, the highest and lowest values were measured as $60.0 \mu\text{m}$ and $7.91 \mu\text{m}$ from RB and UB, respectively. Other raw bentonite samples values varied between $24\text{-}27 \mu\text{m}$.

In the CEC analyzes, its seen that activated samples has lower exchangeable cations than raw ones (see Fig. 3). Because of the hydration ability, Na^+ cations easily replaced the Ca^{2+} cations. Considering the cation exchange tendencies ($\text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$), there were a decrease in the CEC values of all samples due to Na^+ were lower than Ca^{+2} [24,25]. However, due to the low concentration (2.5% by weight) of soda activation, a significant change was not determined.

SSA values of the raw bentonite samples were determined lower than raw samples (see Fig. 4). With the Na^+ entered between the particles and settled in the spaces between the layers, micro cracks filled. Thus, porosity and permeability decreased [26].

According to the SEM images of the raw bentonites, it is seen that the samples have thin and porous form. These images are expressed as tulle morphology and associated with smectite group clays. Also, it is seen that the samples have irregular dimension and shape of all. Additionally, it is clearly seen that some particles come together to form larger pieces in the form of lumps. Moreover, it is seen that the SEM images of activated bentonites are in similar form to the raw ones. In addition, it is determined that the dispersion tendencies of the lumps increased for all of the samples after the activation process and moderate dispersions occurred.

3.2. Analyzing of the Viscosity, GS and Filtration Results

AV, PV and YP analyzes were applied for determining to flow properties of the muds. AV was measured for real time viscosity estimation and flowability determination; PV was measured for solid content effect on viscosity; and YP was measured for transition initial SS from static to dynamic phase. Analyzes results given in Figure 6 and Figure 7.

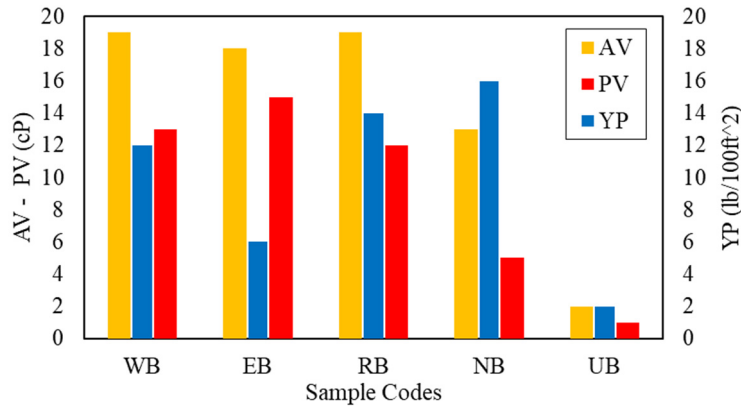


Figure 6. Viscosity results of raw bentonites

The maximum AV values with 19 cP were recorded from WB and RB in raw samples. Also, the minimum value was obtained with 2 cP from UB. When evaluated the activated samples, AV values were recorded 25 cP from NB as highest and 9 cP from UB as lowest. Evaluating the activation effect, it was seen that AV increased with activation for WB, EB and RB as 23.5%, 22.2% and 31.5% respectively. Also, it was noticed that NB reached nearly twice the value and UB reached nearly four times. According to the API 13A standard, it should have an AV of at least 15 cP to be used as drilling mud. For raw samples, it was determined that WB, EB and RB suitable for API with as 19 cP, 18 cP and 19 cP, respectively. For activated samples, it is determined that all muds suitable for the standard except UB (9 cP).

The highest PV was recorded from EB with 15 cP and lowest with 1 cP from UB. In the activated samples, PV were recorded 16 cP from WB and NB as highest and 3 cP from UB as lowest. When evaluated the activation effect, an increase observed for WB, NB and UB by 1.23, 3.2 and 3 times respectively. A decrease observed for EB and RB by 33.3% and 8.3%.

YP obtained as maximum and minimum from NB and UB with 16 lb/100ft² and 2 lb/100ft², respectively in raw suspensions. In addition, the highest values in activated samples were from EB and RB with 24 lb/100ft²; the lowest was determined as 10 lb/100ft² from WB. After the activation, an increase in YP observed all samples except WB (decrease 16.6%). It is determined that these increases were highly in some samples such as 18 lb/100ft² for EB, 10 lb/100ft² for RB, 9 lb/100ft² for UB. Also 2 lb/100ft² increase observed in NB.

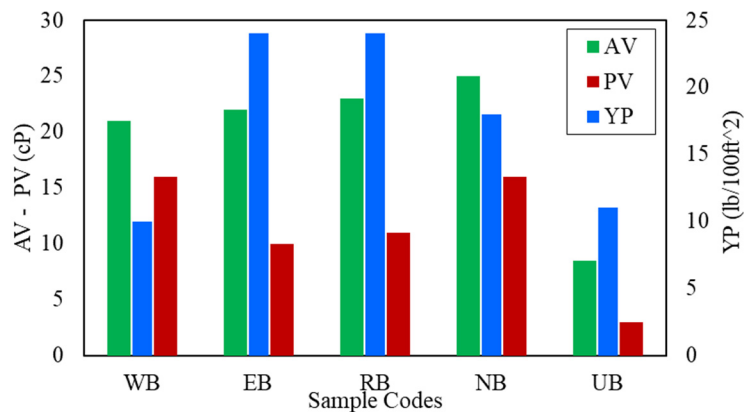


Figure 7. Viscosity results of activated bentonites

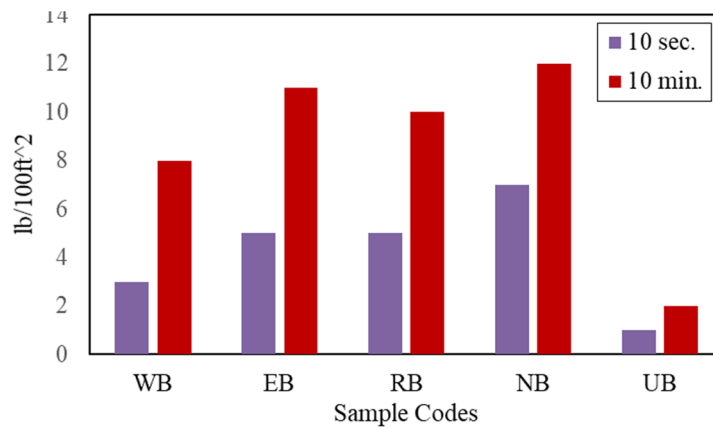


Figure 8. GS of raw bentonites

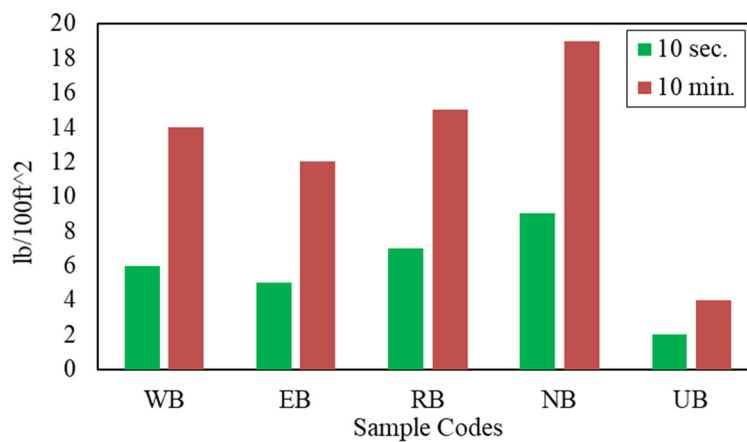


Figure 9. GS of activated bentonites

GS analyzes were applied for determined to TP properties of the muds in non-flow times and results given in Figure 8 and Figure 9. GS results (10 sec.) of the muds prepared with raw bentonites showed that ranges from 1 lb/100ft² (UB) to 7 lb/100ft² (NB). Also, increases were determined after the activation and these increases ranges from 1 lb/100ft² to 3 lb/100ft² except EB. There was no determined any changes in EB with activation (5 lb/100ft²). In addition, GS results (10 min.) of the muds (prepared with raw bentonites) showed that ranges from 2 lb/100ft² (UB) to 12 lb/100ft² (NB). In addition, increases were determined ranges from 1 lb/100ft² to 7 lb/100ft² after the activation. Results showed that alkaline activation increased the GS. With the cation exchange, swelling properties of the bentonites improved and more water molecules settled into the layers.

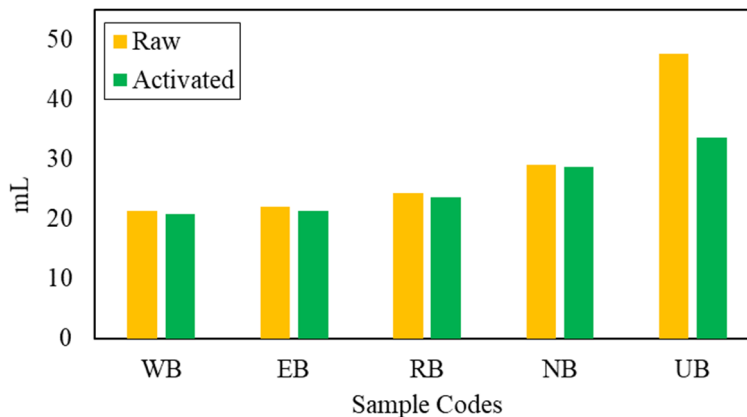


Figure 10. Filtrate volumes of bentonites

In the filtration analysis, the lowest filtrate volume was determined from WB (21.4 mL) and highest from UB (47.6 mL) in the muds prepared with raw bentonites. In addition, 20.9 mL (WB) and 33.7 mL (UB) filtrates were determined as maximum and minimum after the activation (see Fig. 10). Results showed that filtrates decreased with the activation. With the increase in swelling capability, a thickening occurred in the mud cake and the filtrate in the mud was less able to pass into the cylinder. These decreases were measured as 2.33% for WB, 3.62% for EB, 3.28% for RB, 1.03% for NB and 29.2% for UB.

3.3. Analyzing of the TP

TP analyzes of the suspensions were evaluated in two sections as STI and TI. These analyzes were associated with thixotropy of the suspensions. Increasing of STI and decreasing of TI indicate improved TP. STI and TI values are given in Figure 11 and Figure 12, respectively.

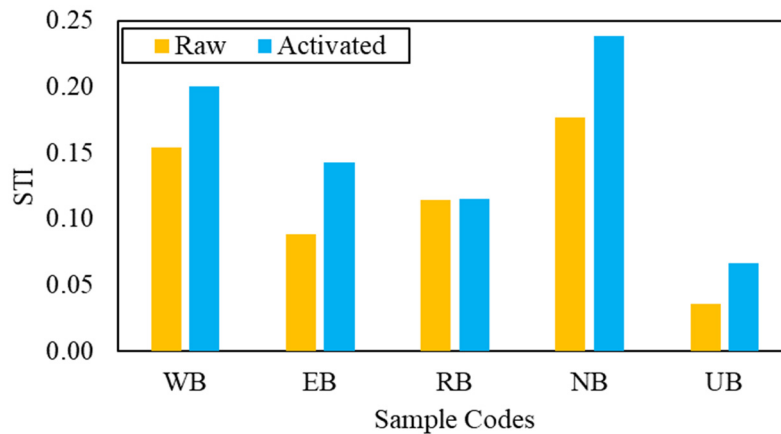


Figure 11. STI values of bentonites

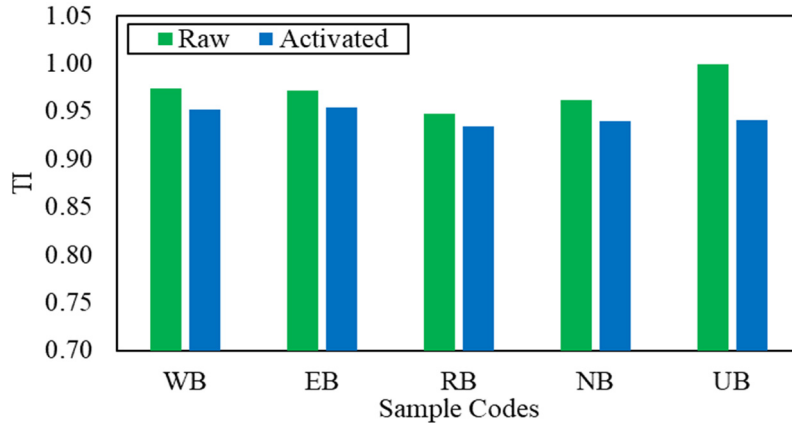


Figure 12. TI values of bentonites

In the STI analysis, it was observed that there was an increasing for all suspensions after the activation. STI increased 33.3%, 55.5%, 9.1%, 33.3% and 75% for WB, EB, RB, NB and UB respectively. Also, in the TI analysis, it was observed that there was a decreasing. These decreasing ratios were 2.06%, 2.06%, 2.1%, 2.08% and 6% for WB, EB, RB, NB and UB respectively. These results showed that TP improved, and activation get positive effect.

3.4. Rheology and Model Determination

The rheograms (also named as flow curves) were prepared with SS values versus the SR (Figure 13 and Figure 14). Rheology profiles were determined according to these flow curves. According to the results, it was clearly seen that the muds show yield pseudoplastic flow. Also, rheograms showed that the SS values measured at low SR (<200 rpm) are close to each other, the difference is greater at high SR (>300 rpm). In addition, SS values increased at all SR after the activation.

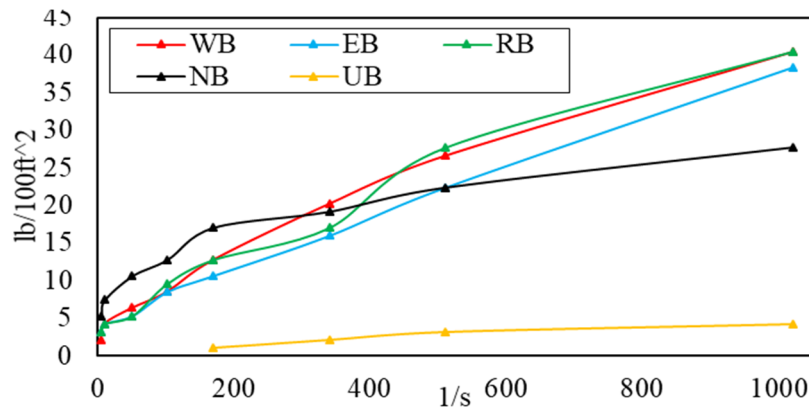


Figure 13. Rheograms of raw bentonites

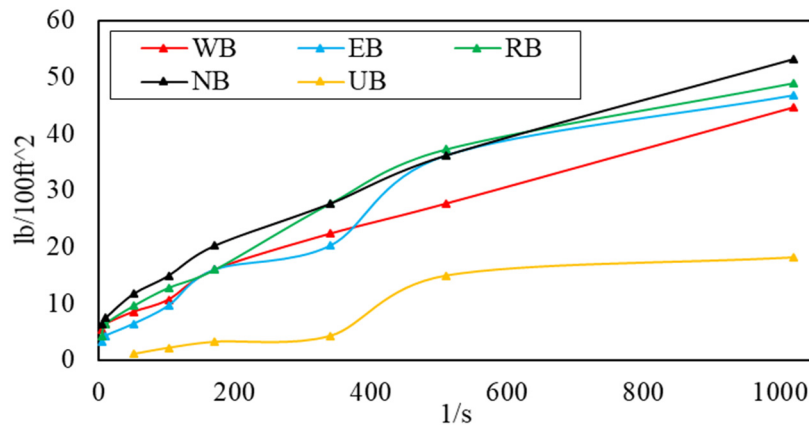


Figure 14. Rheograms of activated bentonites

Model parameters of the muds calculated using LSM and results given Table 3 and Table 4. According to the results, it was determined that the EB showed the best suitable result with 0.9987 R^2 for HBM among the raw bentonite suspensions. Also, the UB showed the most unsuitable result with 0.9160 R^2 . Among the activated bentonite suspensions, it was determined that the NB showed the best suitable result with 0.9985 R^2 value for HBM. Also, the UB showed the most unsuitable result with 0.7958 R^2 .

Table 3. Model parameters of raw samples

Samples	Model parameters	Model equation	Statistical results
WB	$k = 0.511$ $n = 0.628$ $\tau_y = 0.548$	$\tau = 0.548 + 0.511 \cdot \dot{\gamma}^{0.628}$	$R^2 = 0.9959$ RMSE = 0.7840
EB	$k = 0.082$ $n = 0.875$ $\tau_y = 3.205$	$\tau = 3.205 + 0.082 \cdot \dot{\gamma}^{0.875}$	$R^2 = 0.9987$ RMSE = 0.4079
RB	$k = 0.761$ $n = 0.570$ $\tau_y = 0.458$	$\tau = 0.458 + 0.761 \cdot \dot{\gamma}^{0.570}$	$R^2 = 0.9773$ RMSE = 1.8424
NB	$k = 3.087$ $n = 0.314$ $\tau_y = 0.411$	$\tau = 0.411 + 3.087 \cdot \dot{\gamma}^{0.314}$	$R^2 = 0.9931$ RMSE = 0.5967
UB	$k = 0.288$ $n = 0.415$ $\tau_y = 1.034$	$\tau = 1.034 + 0.288 \cdot \dot{\gamma}^{0.415}$	$R^2 = 0.9160$ RMSE = 0.9436

Table 4. Model parameters of activated samples

Samples	Model Parameters	Model Equation	Statistical Results
WB	k = 0.144 n = 0.811 $\tau_y = 5.321$	$\tau = 5.321 + 0.144 \cdot \gamma^{0.811}$	R ² = 0.9971 RMSE = 0.6748
EB	k = 3.938 n = 0.372 $\tau_y = 8.239$	$\tau = 8.239 + 3.938 \cdot \gamma^{0.372}$	R ² = 0.9316 RMSE = 3.9095
RB	k = 3.402 n = 0.394 $\tau_y = 5.075$	$\tau = 5.075 + 3.402 \cdot \gamma^{0.394}$	R ² = 0.9651 RMSE = 2.8064
NB	k = 0.655 n = 0.622 $\tau_y = 4.136$	$\tau = 4.136 + 0.655 \cdot \gamma^{0.622}$	R ² = 0.9985 RMSE = 0.5777
UB	k = 3.350 n = 0.280 $\tau_y = 7.991$	$\tau = 7.991 + 3.350 \cdot \gamma^{0.280}$	R ² = 0.7958 RMSE = 2.9609

4. CONCLUSION

The aim of this study was to determine the rheological and filtration properties of bentonites and to improve flow properties for drilling applications by dry alkaline activation. For this purpose, comprehensive works were conducted in experiments. It was determined that the activation showed a positive effect on the rheological properties of bentonites such as AV, PV, YP, GS, STI and TI. The TP of the drilling fluids were improved, and fluid losses were decreased. Alkaline activation of bentonites with 2.5 wt.% Na₂CO₃ and 0.5 wt.% MgO improved the flow properties of the muds. Therefore, activated bentonites usability in oilfields can be increased and provided less use of other high costly rheology additives (such as PAC and polymers) that increase viscosity. Also, some raw bentonites can be used directly in drilling fluids, however it was determined that it better results were obtained with the activation. Flow properties of drilling fluids in wellsite can be determined with the development of computer solutions and analytical programs easily. Thus, dynamic flow profiles of the drilling fluids in the well can be estimated without practical applications with high accuracy. In the rheological model evaluation according to HBM, the results showed that the EB is the most suitable with 0.9987 R² value among the raw bentonite samples, the NB is the most suitable with 0.9985 R² value among the activated ones. Thus, it will be possible to prepare less costly and more convenient drilling muds with this samples.

5. ACKNOWLEDGEMENT

This study supported by Cukurova University Scientific Research Projects Department with the Project Code FDK-11786. Also, the scientific results that given in this study obtained from the scope of PhD thesis of first author within Cukurova University Institute of Natural and Applied Sciences.

6. REFERENCES

1. Koutsopoulo, E., Christidis, G.E. & Marantos, I. (2016). Mineralogy, geochemistry and physical properties of bentonites from the Western Thrace Region and the islands of Samos and Chios, East Aegean, Greece. *Clay Minerals*, 51, 563-88.
2. Luckham, P.F., Rossi, S. (1999). The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions. *Advances in Colloid and Interface Science*, 82(1-3), 43-92.
3. Mpofu, P., Addai-Mensah, J. & Ralston, J. (2004). Flocculation and dewatering behaviour of smectite dispersions: effect of polymer structure type. *Minerals Engineering*, 17(3), 411-23.
4. Shakeel, A., Safar, Z., Ibanez, M., Van Paassen, L. & Chassagne, C. (2020). Flocculation of clay suspensions by anionic and cationic polyelectrolytes: a systematic analysis. *Minerals*, 10(11), 999-1023.

5. Bergaya, F., Lagaly, G. (2013). Handbook of clay science: Developments in clay science (2nd ed.). Elsevier, United Kingdom.
6. Zhou, C., Tong, D. & Yu, W. (2019). Smectite nanomaterials: preparation, properties, and functional applications, nanomaterials from clay minerals. Elsevier, United Kingdom.
7. Hwang, J., Pini, R. (2019). Supercritical CO₂ and CH₄ uptake by illite-smectite clay minerals. *Environmental Science & Technology*, 53(19), 11588-11596.
8. Abdou, M.I., Ahmed, H.S. (2011). Effect of particle size of bentonite on rheological behavior of the drilling mud. *Journal of Petroleum Science and Technology*, 29, 2220-2233.
9. Abdollahi, M., Pourmahdi, M. & Nasiri A.R. (2018). Synthesis and characterization of lignosulfonate/acrylamide graft copolymers and their application in environmentally friendly water-based drilling fluid. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 171, 484-494.
10. Xiang, G., Ye, W., Xu, Y. & Jalal, F. E. (2020). Swelling deformation of Na-bentonite in solutions containing different cations. *Engineering Geology*, 277, 105757.
11. Harjupatana, T., Miettinen, A. & Kataja, M. (2022). A method for measuring wetting and swelling of bentonite using X-ray imaging. *Applied Clay Science*, 221, 106485.
12. Afolabi, R.O., Orodu, O.D. & Efeovbokhan V.E. (2017). Properties and application of Nigerian bentonite clay deposits for drilling mud formulation: recent advances and future prospects. *Applied Clay Science*, 143, 39-49.
13. Lagaly, G. (2006). Handbook of clay science: developments in clay science (2nd ed.). Elsevier, United Kingdom.
14. Goel, P.N., Anand, A., Anand, S.R., Jha, K. & Richhariya, G. (2022). Development of cost-effective drilling fluid from banana peel pectin and fly ash for loss circulation control. *Materials Today: Proceedings*, 62, 4177-4181.
15. Erdoğan, Y., Kök O.E. (2019). Production and characterization of nanobentonite from sodium bentonite with mechanical grinding. *Fresenius Environmental Bulletin*, 28(11), 8141-8150.
16. Agwu, O.E., Akpabio, J.U., Ekpenyong, M.E., Inyang, U.G., Asuquo, D.E., Eyoh, I.J. & Adeoye O.S. (2021). A comprehensive review of laboratory, field and modelling studies on drilling mud rheology in high temperature high pressure (HTHP) conditions. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 94, 104046.
17. Altun, G., Osgouei, A.E. (2014). Investigation and remediation of active-clay contaminated sepiolite drilling muds. *Applied Clay Science*, 102, 238-245.
18. Karagüzel, C., Çetinel, T., Boylu, F., Çinku, K. & Çelik, M.S. (2010). Activation of (Na, Ca)-bentonites with soda and MgO and their utilization as drilling mud. *Applied Clay Science*, 48, 398-404.
19. Kök, O.E., Vapur, H. & Erdoğan, Y. (2023). Rheological behavior of activated bentonite suspensions and estimation of flow models using least squares method. *Geoenergy Science and Engineering*, 230, 212181.
20. API SPEC 13-A, (2010). Specification for Drilling Fluids Materials. American Petroleum Institute, Washington.
21. API SPEC 13-I, (2020). Laboratory Testing of Drilling Fluids. American Petroleum Institute, Washington.
22. Caenn, R., Darley, H.C. & Gray, G.R. (2011). Composition and properties of drilling and completion fluids. Gulf professional publishing, Elsevier.
23. Savins, J.G., Roper, W.F. (1954). A direct indicating viscometer for drilling fluids. American Petroleum Institute (API-54-007), New York.
24. Yıldız, N., Sarıkaya, Y. & Çalmlı, A. (1999). The characterization of Na₂CO₃ activated Kütahya bentonite. *Turkish Journal of Chemistry*, 23(3): 309-318.
25. Çinku, K., Boylu, F., Duman, F. & Çelik, M.S. (2010). The effect of the presence and amount of ions in the water on the product properties in the enrichment and activation of bentonites with soda. *Istanbul University Journal of Engineering Sciences*, 1(1), 9-18.
26. Karimi, L., Salem, A. (2011). Analysis of bentonite specific surface area by kinetic model during activation process in presence of sodium carbonate. *Microporous and mesoporous materials*, 141(3), 81-87.

Experimental Investigation of Local Flexible Surface on Aerodynamic Effects for Finite Wing with NACA0018 Section

Ali Emirhan EROĞLU^{1,a}, Tahir DURHASAN^{1,b}, Javad Rashid JAFARİ^{1,c},
İlyas KARASU^{2,d}

¹Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Department of Aerospace Engineering, Türkiye

²Samsun University, Department of Aerospace Engineering, Samsun, Türkiye

^aORCID: 0009-0002-7006-2875; ^bORCID: 0000-0001-5212-9170; ^cORCID: 0009-0007-7497-7892;

^dORCID: 0000-0003-3138-6236

Article Info

Received : 02.01.2025

Accepted : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665840

Corresponding Author

Tahir DURHASAN

tdurhasan@atu.edu.tr

Keywords

NACA0018

Flexible surface

Aerodynamic performance

Finite wing

How to cite: EROĞLU, A.E., DURHASAN, T., JAFARİ, J.R., KARASU, İ., (2025). Experimental Investigation of Local Flexible Surface on Aerodynamic Effects for Finite Wing with NACA0018 Section. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(1), 61-68.

ABSTRACT

The experimental study is conducted in low-speed wind tunnel in order to explore the effects of flexible surface on the aerodynamic performance of NACA0018 finite wing. In this purpose, lift and drag force of the wing measured using six axes load cell over the angle of attack 0° - 18° at different Reynolds numbers. Moreover, surface oil flow visualization experiments are performed to depict the flow structure over wing. The flexible wing remarkably improves aerodynamic performance at $Re=3 \times 10^4$, and it also enhances the lift coefficient and diminishes the drag coefficient. The stall angle is delayed from 2.5° to 7° . It is observed that stall angle is shifted further angle of attack when Reynolds number increased. However, the effect of flexible surface on the aerodynamic performance diminishes with increasing Reynolds number. Furthermore, the observed tip vortex and laminar separation bubble significantly influence the surface flow structure.

NACA0018 Kesitli Sonlu Kanat için Yerel Esnek Yüzey Aerodinamik Etkilerinin Deneysel İncelenmesi

Makale Bilgileri

Geliş : 02.01.2025

Kabul : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665840

Sorumlu Yazar

Tahir DURHASAN

tdurhasan@atu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

NACA0018,

Esnek yüzey,

Aerodinamik performans,

Sonlu kanat

Atf şekli: EROĞLU, A.E., DURHASAN, T., JAFARİ, J.R., KARASU, İ., (2025). NACA0018 Kesitli Sonlu Kanat için Yerel Esnek Yüzey Aerodinamik Etkilerinin Deneysel İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(1), 61-68.

ÖZ

Esnek yüzeyin NACA0018 sonlu kanat aerodinamik performansı üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla düşük hızlı rüzgar tüneline deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu amaç doğrultusunda hücum açısının 0° - 18° aralığında ve Reynolds sayısının farklı değerlerinde kanadın taşıma ve sürüklenme kuvvetleri altı eksenli yük hücresi kullanılarak ölçülmüştür. Ayrıca, kanat üzerindeki akış yapısını resmetmek için yüzey yağ akış görselleştirme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Esnek kanadın $Re=3 \times 10^4$ 'te aerodinamik performansı önemli ölçüde iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Esnek yüzeyin taşıma katsayısını arttırmakla birlikte aynı zamanda sürüklenme katsayısını da azalttığı bulunmuştur. Tutunma kaybı açısı $2,5^\circ$ 'den 7° 'ye geciktirilmiştir. Reynolds sayısı arttığında tutunma kaybı açısının daha fazla hücum açısına ötelendiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, esnek yüzeyin aerodinamik performans üzerindeki etkisi Reynolds arttıkça azalmaktadır. Ayrıca, gözlemlenen uç girdabı ve laminer ayrılma kabarcığının yüzey akış yapısı önemli ölçüde etkilemektedir.

1. INTRODUCTION

Recent advancements in aerodynamics have heightened interest in understanding the role of flexibility and fluid-structure interactions on the performance of an airfoil. Flexible wing designs, including morphing and membrane wings, have been identified as promising improvements to enhance lift and delay stall across various applications, from micro air vehicles (MAVs) to wind turbines [1,2]. The concept of partially flexible wings, which allows for static flexibility alterations, has aroused interest due to its potential to maintain optimal performance over diverse flight conditions. Despite these benefits, practical implementation remains challenging due to design complexity and material limitations [3,4].

Laminar separation bubbles (LSBs), often observed in low Reynolds (Re) number regimes, significantly impact aerodynamic performance by inducing separation, increasing drag, and reducing lift. Studies on both rigid and flexible airfoils have shown that flexibility can mitigate the negative effects of LSBs by suppressing separation and promoting reattachment. For instance, partially flexible membranes applied to airfoil surfaces have demonstrated improved lift-to-drag ratios and delayed stall angles. These findings underscore the importance of fluid-structure interaction in the development of advanced aerodynamic surfaces. Therefore, the advantages as well as the limitations of the flexible wings were thoroughly examined to reveal the size of LSB and the flow visualization downstream of the wing [5]. Also, Acikel and Genc [1] experimentally investigated the use of a partial flexible surface on the suction side of an airfoil to eliminate LSB at three different Re numbers. Even though they presented how the deformation and vibration mitigated the adverse effects of vortices such as producing improved lift and lower drag coefficients, the effectiveness of this method decreased with increasing Re numbers. At low Re numbers relevant to MAVs applications, Lian and Shyy [6] compared the performance of a rigid airfoil with a fully flexible suction surface. In their numerical study, they have demonstrated unsteady aerodynamic transitions at various angles of attacks by giving insights how the vibration of a flexible membrane would help prevent stall conditions. Since the ability of an airfoil to achieve higher lift is directly related to its geometrical structure, Yavuz [7] were numerically investigated the behaviors of both mechanical and aerodynamic performance of a free-formed airfoil, adapted from a NACA airfoil. The updated design effectively yields a better lift coefficient, additionally, for these cases, flow visualization with the help of surface oil visualization method provides insights into the flow phenomena, such as the vortex shedding mechanism as well as the presence of LSBs [8].

Moreover, the aeroelastic responses of flexible airfoils were examined in detail under various angles of attack and flow velocity conditions, with discussions addressing the associated flow phenomena [9] and the handling quality of the wing [10]. Kang et al. [11] and Lei et al. [12] numerically conducted 2D locally flexible surfaces to interpret the unsteady flow separation as well as the fluid-structure interaction. In their studies, the effects of flexibility and elastic stiffness on the lift generation were thoroughly investigated at low Re numbers. Their results reveal that optimal coupling between structural vibrations and vortex shedding frequencies can enhance lift through coherent vortex formation, while mismatched frequencies lead to irregular flow patterns and aerodynamic performance degradation. Additionally, the oscillation of the flexible surface generates downstream moving vortices and facilitates transport between the shear layer and the main flow, reducing separated regions and pressure on the upper surface. These mechanisms demonstrate the feasibility of flow control through flexible surface to improve lift. However, they stated that further research is required to address turbulence effects, low-aspect ratio configurations, and three-dimensional dynamics to advance the understanding of such systems. Boughou et al. [13] explored the fluid-structure interaction of hyperelastic morphing wing structures under low aerodynamic loads. The morphing wing consists of a rigid segment and a flexible segment, with the flexible portion occupies 60% of the chord length and constructed from a hyperelastic rubber-like material. The wing, with a flexible portion made of rubber-like material, shows enhanced efficiency at higher Re numbers and low angles of attack. These findings emphasize the potential of hyperelastic morphing wings for adaptive and efficient design applications. Similarly, Roy and Mukherjee [14] studied the aerodynamic performance of various wing sections (e.g., NACA0012, NACA4415, and NRELS809) to analyze the effects of morphing. Their investigation focused on pre- and post-stall angles of airfoils with flexible surface, comparing their performance to that of baseline airfoils. with the comparison of the baseline airfoils. In addition to passive control of fluid flow, He et al. [15] actively manipulated the suction surface of an airfoil utilizing a local flexible material driven by piezoelectric actuators that enhances the lift, and they also observed drag reduction at angles of attack (α) ranging between 10° and 14° in which the base airfoil experiences stall

under these conditions. By adjusting the actuation frequency, they achieved a maximum lift increase of 27.1% at angle of attack of 12° .

Furthermore, these types of flexible surfaces can be commonly used in wind turbine applications [16]. In Darrieus turbines, flexible profiles of NACA0018 and cambered GÖ420 have been separately applied between rigid leading edge and trailing edges. This design accomplishes higher lift and torque coefficients, leading to significant gains in power output, especially at low tip-speed ratios, thereby addressing a key limitation of these turbines. Also, the low manufacturing cost demonstrates promising potential for efficiency enhancement with proposed design improvements to reduce drag. For SD7062 wind turbine airfoils, the flow transition from laminar to turbulence was thoroughly presented [17]. The formation of LSB was observed at $\alpha=8^\circ$ for the specific location of the chord length. However, the flow structure transformed to a turbulent region because of reattachment of the flow when the locally flexible surface applied. Additionally, the stall angle was postponed from 10° to 12° compared to the baseline case.

Even though flexible surfaces on airfoils are available in the literature, the focus has predominantly been on infinite wing. However, their potential for finite wing remains underexplored. This study aims to further investigate the effects of finite wing flexibility on aerodynamic performance via experimental analysis. By focusing on low Reynolds number flows, this study explores how flexible surface deformation interacts with fluid flow to enhance aerodynamic efficiency, contributing to the advancement in modern aeronautics, such as adaptive morphing wing designs for MAV applications. Experiments were conducted on a NACA0018 finite wing by applying locally flexible surfaces to both sides of the wing for 3×10^4 and 10×10^4 of Re numbers based on chord length. Based on the results, it was shown that integrating flexible surfaces can result in effective flow control.

2. MATERIAL AND METHOD

The experiments were conducted in a suction type and low-speed wind tunnel in the Aerodynamic Laboratory of the Department of Aerospace Engineering at the University of Adana Alparslan Türkeş Science and Technology. The wind tunnel has a square test section with a dimension of $600\text{mm} \times 600\text{mm}$, surrounded with a transparent plexiglass wall for observation of the flow phenomena. The tunnel could run at the maximum speed of 20 m/s. The turbulence intensity in the tunnel test section is less than 1 % for this study. Figure 1 schematically illustrates the experimental setup, including the airfoil with a servo motor for adjusting its angles of attack and a six-axis load cell for measuring the forces acting on the airfoil.

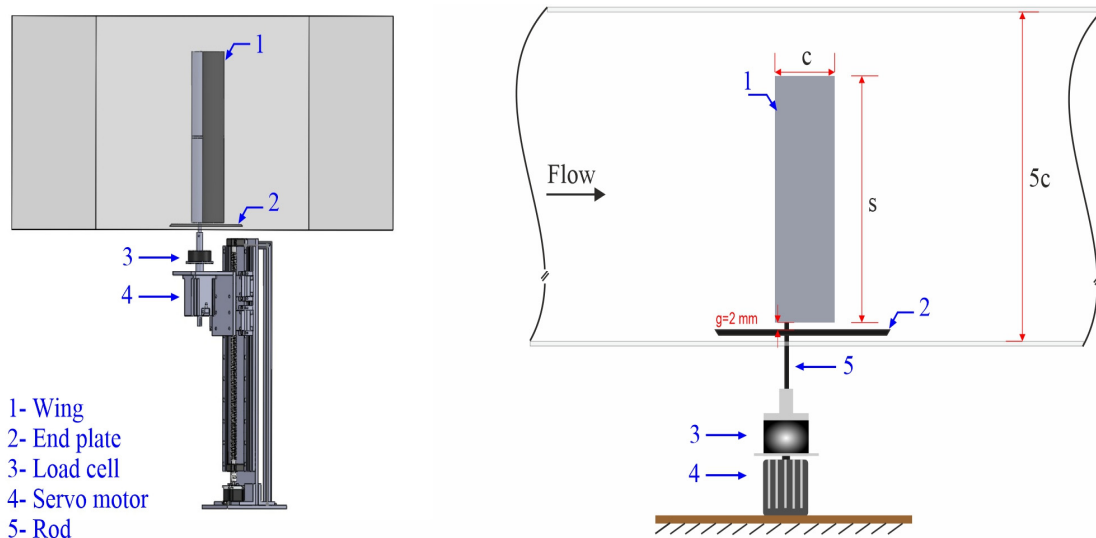


Figure 1. Experimental setup of the wind tunnel

NACA 0018 finite wing model was used in the present study. The chord length (c) was 120 mm, and span length (s) was 480 mm, corresponding to an aspect ratio of 4. The design and fabricating processes of the partially flexible NACA0018 airfoil were presented in Figure 2. The position of flexible membrane material was identified from $x/c=0.35$ to $x/c=0.85$ since laminar separation bubble dominate in that region for the

rigid NACA0018 airfoil at moderate angle of attack. The flexible membrane was supported by a rib having a thickness of 0.0125s in the middle of the span. After the design processes, airfoils were produced by a 3D printer. The produced airfoil was rubbed via sandpaper to prevent the roughness effect of the solid surface. The flexible material used in this study was a 0.2 mm latex rubber sheet having Young's modulus of 2.2 MPa. The flexible membrane was attached to the frames over the airfoil by using 0.05 mm thin double-sided tape.

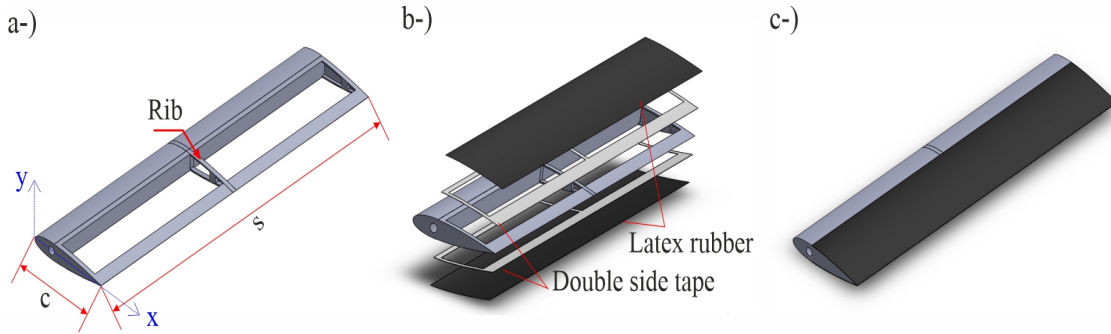


Figure 2. NACA0018 airfoil: (a) without flexible materials (b) fabricating process and (c) final product with partial flexible surfaces

Aerodynamic force measurements were conducted at two different Reynolds (Re) numbers based on chord length 3×10^4 and 10×10^4 . Lift and drag force data were collected using six-axis load cell at a sampling rate of 1000 Hz over a time interval of 20 s for all cases. Force measurement system has accuracy of 0.5% of full scale. Experiments were performed at angle of attack between 0° and 18° . After lift (F_L) and drag (F_D) forces were obtained, it has calculated the dimensionless coefficients of lift (C_L) and drag (C_D) in conjunction with Equation 1 and 2.

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

$$C_D = \frac{F_D}{0.5\rho U_\infty^2 A} \quad (2)$$

where ρ , U_∞ , and A denote the density of air, free-stream velocity, and projection area of the airfoil.

Surface oil visualization were carried out to reveal the effect of laminar separation bubble and tip vortex on the upper surface flow characteristic at angle of attack $\alpha=4^\circ$, 8° and 12° . The surface oil visualization is based on the painted matte black wing surface by pigmented oil and then dried via flow to obtain a flow pattern. The mixture consists of kerosene, titanium dioxide and a very small amount of oleic acid.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Surface oil visualization over rigid finite wing is presented in Figure 3 in order to depict the effect of laminar separation bubble and tip vortex on the flow structure at angle of attack of $\alpha=4^\circ$, 8° and 12° . It is seen that the boundary layer separated approximately at $x/c=0.2$ and then reached at $x/c=0.5$. The dense pigment area between the separation (LS) and reattached (R) point indicates the formation of a laminar separation bubble (LSB). It is also observed that trailing edge separation (TS) occurs at $x/c=0.8$. The tip vortex directs the flow inwards and creates a chaotic flow structure marked by the dashed turquoise line in this figure. Moreover, it affects the LSB over the wing. As the angle of attack increases from 4° to 8° , the separation and reattachment points shift closer to the leading edge, and the size of the laminar separation bubble decreases. At $\alpha=12^\circ$, separated boundary layer is not reattached, so stall occurs. Furthermore, the tip vortex enlarges, shifts inward along the wing, and becomes more dominant in shaping the upper surface flow structure as the angle of attack increases. Oil visualization experiments were not performed at 3×10^4 because the momentum of the flow was too low to sweep away the oil mixture.

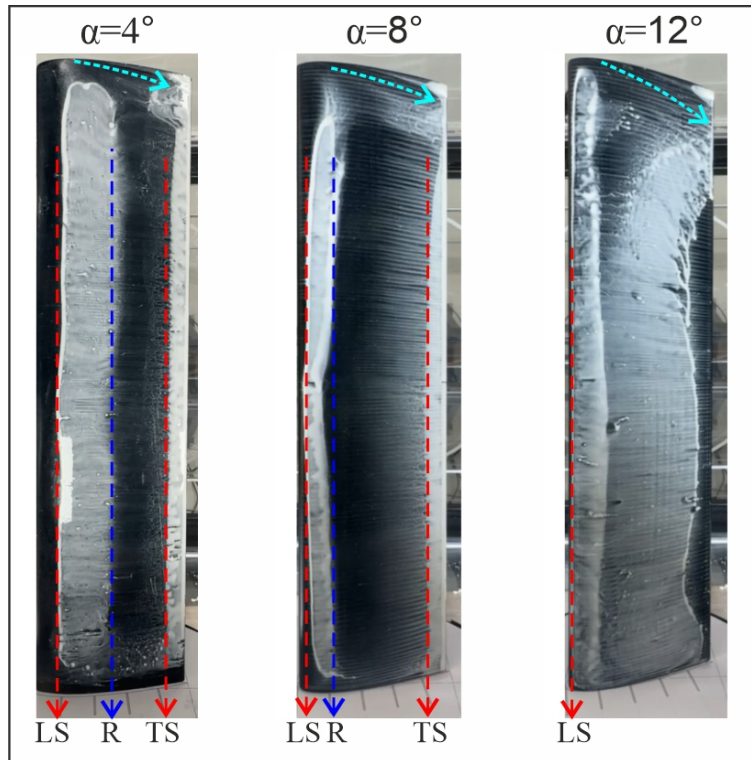


Figure 3. Oil flow visualization over rigid finite wing at $Re=10 \times 10^4$

The effect of flexibility on the mean lift coefficient (C_L) of NACA0018 finite wing is shown in Figure 4 at Reynolds number of $Re=3 \times 10^4$ and 10×10^4 . The C_L variation for rigid NACA 0018 finite wing is also presented in order to constitute as a reference. At angle of attack $\alpha=0^\circ$, the value of C_L is zero for all cases due to symmetrical wing. At $Re=3 \times 10^4$, the rigid wing generates lift force when the angle of attack is increased from 0° to 2° (Figure 4a). However, the rise in C_L is observed only up to the angle of attack $\alpha=2.5^\circ$. Beyond this angle of attack, the variation of C_L with the angle of attack indicates formation of smooth stall for rigid wing. On the other hand, the C_L distribution of the flexible membrane wing is substantially different from that of its rigid equivalent. It is clearly seen that flexible wing significantly postpones the stall angle in comparison with rigid wing at $Re=3 \times 10^4$. The C_L remarkably increases with the increasing angle of attack and reaches its maximum value at $\alpha=7^\circ$. A sudden decrease in C_L at $\alpha=8^\circ$ indicates the formation of abrupt stall for flexible wing. Figure 4b compares C_L of rigid and flexible wings at $Re=10 \times 10^4$. It is observed that Reynolds number significantly effective on the C_L distribution. The lift curves display nearly linear variation at moderate angles of attack for both wings. The stall angle and also maximum C_L are significantly enhanced when Reynolds number is increased from 3×10^4 to 10×10^5 for rigid and flexible wings. The maximum C_L is obtained at $\alpha=11^\circ$ and 11.5° for rigid and flexible wing, respectively. Furthermore, flexible wing shows abrupt stall behavior at $Re=10 \times 10^4$ on the contrary to $Re=3 \times 10^4$. On the other hand, the flexible wing has insignificant effect on the C_L in comparison with rigid wing at $Re=10 \times 10^4$. Similar trend is also observed by Genc et. al (2020). They demonstrated that the effect of flexibility on the aerodynamic performance of NACA4412 decreases with increasing Reynolds number and it behaves like a rigid wing at $Re=7.5 \times 10^4$. It should be pointed out that the flexible wing exhibits higher performance on C_L in the post-stall region at $Re=3 \times 10^4$ and 10×10^4 when compared to the rigid wing.

The distribution of drag coefficient (C_D) for rigid and flexible wings at $Re=3 \times 10^4$ and 10×10^4 are depicted in Figure 5. It is seen that the flexibility is not only effective on the C_L but also on the C_D . Furthermore, flexible wing exhibits different behavior in pre and post stall regions when compared to the rigid wing. It is observed that at the $Re=3 \times 10^4$, flexible wing has a significantly lower drag than the rigid wing (Figure 5a) up to $\alpha=7^\circ$. On the other hand, in the post stall region, the flexible wing has remarkably higher drag than the rigid wing. As the Reynolds number is increased, drag coefficient of flexible wing is nearly same with rigid wing up to stall angle (Figure 5b). However, C_D of flexible wing is greater than rigid wing in the post stall region.

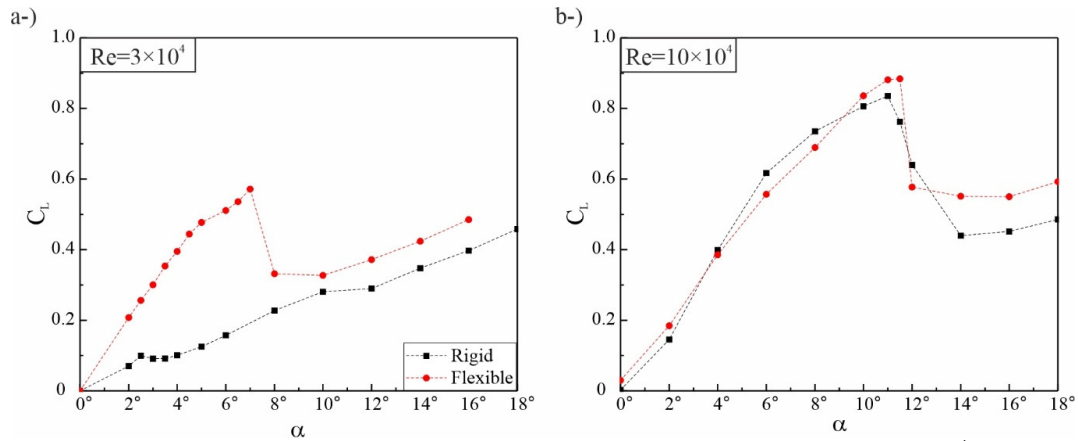


Figure 4. The variation of C_L with angles of attack for rigid and flexible wings at $Re=3 \times 10^4$ and 10×10^4 .

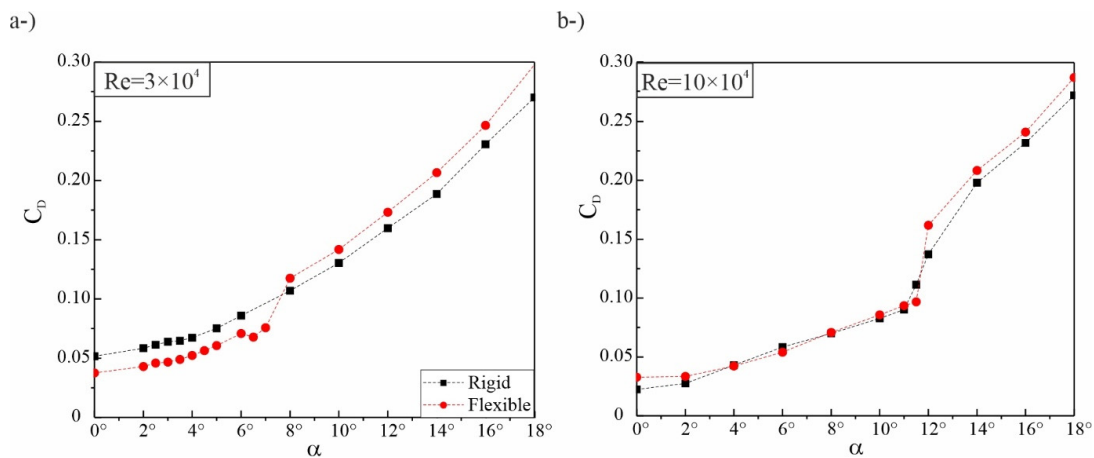


Figure 5. Distribution of C_D for rigid and flexible wing at $Re=3 \times 10^4$ and 10×10^4 .

In order to better compare the aerodynamic performance of rigid and flexible wings at $Re=3 \times 10^4$ and 10×10^4 , the lift to drag variation (C_L/C_D) with angle of attack is illustrated in Figure 6. Figure 6a demonstrated that flexibility significantly improve aerodynamic performance of wing at $Re=3 \times 10^4$. Specifically, C_L/C_D increases up to $\alpha=7^\circ$ for flexible wing. The maximum value of C_L/C_D is about 7.9 for the flexible wing, while it reaches approximately 1.6 for the rigid wing in the pre-stall region. Moreover, the angle of maximum C_L/C_D is delayed from 2.5° to 7° . A sharp decrease occurs at $\alpha=10^\circ$ due to stall for flexible wing. Beyond this angle, the C_L/C_D value approaches that of the rigid wing due to the increased drag and decreased lift in the post-stall region. The flexible wing can provide a more significant C_L/C_D when Reynolds number increased from $Re=3 \times 10^4$ to 10×10^4 . On the other hand, the flexible wing exhibits nearly similar aerodynamic performance with the rigid wing at $Re=10 \times 10^4$. The maximum C_L/C_D equals to 10 at $\alpha=6^\circ$.

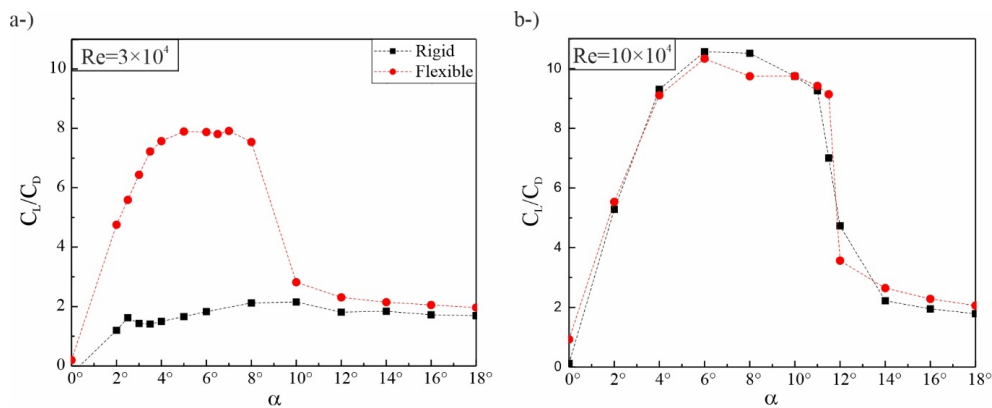


Figure 6. The variation of C_L/C_D for flexible and rigid wing at $Re=3 \times 10^4$ and 10×10^4 .

4. CONCLUSION

This study presents experimental investigation in the wind tunnel in order to reveal the effect of flexible surface on the aerodynamic performance of NACA0018 finite wing at low Reynolds numbers. Aspect ratio of wing was kept constant as 4. Force measurement results indicate that flexible wing significantly improves aerodynamic performance at Reynolds number of 3×10^4 . Stall is postponed by about 5° when compared to the rigid wing. Furthermore, maximum value of lift coefficient increased by 570% in comparison with rigid wing at $Re=3 \times 10^4$. On the other hand, the flexible wing has an insignificant effect on aerodynamic performance at $Re=10 \times 10^4$, as the variations in drag and lift coefficients across different angles of attack are nearly identical to those of the rigid wing. Surface oil flow visualization experiments reveal that the laminar separation bubble dominates the upper surface flow structure at moderate angles of attack, whereas the tip vortex becomes more dominant at $Re=10 \times 10^4$. In the light of obtained results, the improved performance of the NACA0018 finite wing with a flexible surface is expected to enhance energy efficiency and maneuverability for micro unmanned air vehicles (MUAUVs).

5. ACKNOWLEDGEMENT

This study was supported by Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) under Grant Number 223M340. The authors thank to TUBITAK for their supports.

6. REFERENCES

1. Açikel, H.H. & Genç, M.S. (2018). Control of laminar separation bubble over wind turbine airfoil using partial flexibility on suction surface. *Energy*, 165, 176-190.
2. Guo, Q., He, X., Wang, Z. & Wang, J. (2021). Effects of wing flexibility on aerodynamic performance of an aircraft model. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34(9), 133-142.
3. Genç, M.S., Açikel, H.H. & Koca, K. (2020). Effect of partial flexibility over both upper and lower surfaces to flow over wind turbine airfoil. *Energy Conversion and Management*, 219, 113042.
4. Koca, K., Genç, M.S., Bayır, E. & Soğuksu, F.K. (2022). Experimental study of the wind turbine airfoil with the local flexibility at different locations for more energy output. *Energy*, 239, 121887.
5. Demir, H. & Genç, M. S. (2017). An experimental investigation of laminar separation bubble formation on flexible membrane wing. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 65, 326-338. <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2017.05.010>
6. Lian, Y., & Shyy, W. (2007). Laminar-Turbulent Transition of a Low Reynolds Number Rigid or Flexible Airfoil. *AIAA Journal*, 45(7), 1501-1513. <https://doi.org/10.2514/1.25812>
7. Yavuz, M.M. (2021). Flow and mechanical characteristics of a modified naca wing geometry. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(3), 815-825.
8. Tangöz, S. (2024). Investigation of surface flow behaviors on wing model made of different airfoils. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(3), 759-770.
9. Shang, H., Wang, Z., Du, L., Wang, Y. & Sun, X. (2024). Experimental and numerical investigations to the aeroelastic response of flexible thin airfoil. *Physics of Fluids*, 36(6), 067133.
10. Lone, M. & Cooke, A. (2014). Review of pilot models used in aircraft flight dynamics. *Aerospace Science and Technology*, 34, 55-74.
11. Kang, W., Zhang, J., Lei, P. & Xu, M. (2014). Computation of unsteady viscous flow around a locally flexible airfoil at low Reynolds number. *Journal of Fluids and Structures*, 46, 42-58.
12. Lei, P.-F., Zhang, J.-Z., Kang, W., Ren, S. & Wang, L. (2014). Unsteady Flow Separation and High Performance of Airfoil with Local Flexible Structure at Low Reynolds Number. *Communications in Computational Physics*, 16(3), 699-717.
13. Boughou, S., Batistić, I., Omar, A., Cardiff, P., Inman, D.J. & Boukharfane, R. (2024). Investigation on aeroelasticity of morphing wing through dynamic response and virtual structural damping. *Physics of Fluids*, 36(9), 091902.
14. Roy, A. & Mukherjee, R. (2022). Delay or control of flow separation for enhanced aerodynamic performance using an effective morphed surface. *Acta Mechanica*, 233(4), 1543-1566.
15. He, X., Guo, Q., Xu, Y., Feng, L. & Wang, J. (2023). Aerodynamics and fluid-structure interaction of an airfoil with actively controlled flexible leeward surface. *Journal of Fluid Mechanics*, 954, A34.

16. Almalki, H., Safaei, B., Karimzadeh Kolanroudi, M., Sahmani, S., Arman, S. & Shekoofa, O. (2024). Systematic literature review on the design, efficiency and fabrication of wind turbine blades. *International Journal of Ambient Energy*, 45(1), 2374057.
17. Koca, K., Keskin, S., Şahin, R., Veerasamy, D. & Genç, M.S. (2024). Measurements of Flow Characterization Revealing Transition to Turbulence Associated with the Partial Flexibility-Based Flow Control at Low Reynolds Number. *Arabian Journal for Science and Engineering*.

SWARA-MOORA Yöntemi ile Depolama Sistemi Seçimi

Melek IŞIK^{1,a}, Kübra BOLAHATOĞLU^{1,b}

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

^aORCID: 0000-0001-6078-7026; ^bORCID: 0009-0005-7763-4073

Makale Bilgileri

Geliş : 26.07.2024

Kabul : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665844

Sorumlu Yazar

Melek IŞIK

demirtasm@cu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Depolama sistemleri

ÇKKV

SWARA

MOORA

Atf şekli: IŞIK, M., BOLAHATOĞLU, K., (2025). SWARA-MOORA Yöntemi ile Depolama Sistemi Seçimi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(1), 69-77.

ÖZ

Depolama sistemleri, tedarik ve lojistik faaliyetlerinin ilerlemesinde büyük bir paya sahiptir. Hem üretim yapılan alanlarda hem üretim sonrasında etkin olarak kullanılan depolama sistemi faaliyetleri maliyetlerin düşürülmesinde ve verimlilik artışı yaşanmasında önemli rol oynamaktadır. Bu durum mamullerin özelliklerine ve muhafaza edileceği şartlara uygun depolama sisteminin seçimiyle mümkündür. Yapılan çalışmada bir işletmede nihai ürün için uygun muhafaza şartlarının oluşturulması ve ürün takibinin sağlanabilmesi için ideal depolama sisteminin seçimi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda öncelikle istenen kriterler belirlenmiş ve çok-kriterli karar-verme (ÇKKV) yöntemlerinden Kademeli Ağırlık Değerlendirme Oran Analizi (SWARA) yöntemi kullanılarak bu kriterlerin ağırlıkları hesaplanmıştır. Sonrasında uygun depolama sistemi için alternatifler belirlenmiş ve ÇKKV yöntemlerinden Oran Analizine Dayalı Çok Amaçlı Optimizasyon (MOORA) yöntemi yaklaşımları kullanılarak alternatiflerin sıralanması ve ideal olanın seçilmesi işlemleri yapılmıştır. Birim Yük Otomatik Depolama ve Çekme Sistemi (OD/ÇS) tüm yaklaşımlarda en ideal depolama sistemi olarak seçilmiştir.

Selection of a Warehouse System Using the SWARA-MOORA Method

Article Info

Received : 26.07.2024

Accepted : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665844

Corresponding Author

Melek IŞIK

demirtasm@cu.edu.tr

Keywords

Warehouse systems

MCDM

SWARA

MOORA

How to cite: IŞIK, M., BOLAHATOĞLU, K., (2025). Selection of a Warehouse System Using the SWARA-MOORA Method. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(1), 69-77.

ABSTRACT

Warehouse systems have a great share supply and logistics activities. Warehouse system activities, which are used effectively both in the production areas and after production, play an important role in reducing costs and increasing productivity. This is possible selection of a warehouse system suitable for the characteristics of the finished products and the conditions in which they will be stored. In the study, it was aimed to investigate appropriate warehouse conditions for the final product in an enterprise and to select the ideal warehouse system to ensure product tracking. In this direction, the desired criteria were determined first and the weights of these criteria were calculated using the Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis (SWARA) method, one of the multi-criteria decision-making (MCDM) methods. Afterwards, alternatives for the appropriate warehouse system were determined and sorting of alternatives and selecting the ideal one were carried out using Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis (MOORA) method approaches from the MCDM. Unit Load Automated Storage and Retrieval System (AS/RS) has been chosen as the most ideal storage system in all approaches.

1. GİRİŞ

Ülkemizde ve dünyada çok sayıda işletme bulunmaktadır. İşletmeler faaliyetlerini sürdürebilmek ve var olabilmek için diğer işletmelerle rekabet etmek zorundadırlar. En az olumsuzlukla üretime devam edebilmeleri için hammaddenin işletmeye gelişinden nihai ürünün müşteriye ulaşmasına kadar olan tüm sistemler büyük önem taşımaktadır.

Tedarik zinciri ve lojistik süreçler kapsamında depolama aktiviteleri büyük önem gerektiren aktivitelerden biri olarak kabul edilmektedir. Tedarik zinciri; parçaları, hammaddeleri ve alt montajları nihai ürünlere dönüştürmek ve son kullanıcıya ulaştırmak için tedarikçilerin, üreticilerin, depoların, distribütörlerin ve perakendecilerin entegre olmasıdır [1].

Günümüzde lojistik terimi en geniş anlamıyla hammadde kaynağından ürünün tüketiminin son noktasına kadar üretim dışındaki her türlü mal, hizmet ve bilgi akışı faaliyetlerini kapsamaktadır. Ayrıca, lojistik kavramı içerisinde her çeşit bilimsel araştırma konusunu, pek çok araç teknik ve stratejik etkinlikleri barındırmaktadır [2]. Lojistik faaliyetlerin esasını mamul, yarı mamul ve hammadde hareketliliği bir başka ifade ile taşıma operasyonları oluşturur. Bu hareketliliğin durduğu yerlere depo, stok alanı, dağıtım merkezi, antrepo, ambar, aktarma merkezi, transfer merkezi gibi isimler verilmektedir [3].

Depolama sistemleri, lojistik faaliyetlerin ve tedarik zincirinin önemli bir halkasını oluşturmaktadır. Malzeme ve bilgi akışını sağlıklı şekilde sürdürerek üretim ve dağıtım dengesini sağlamakta doğru depolama sisteminin seçimi büyük önem arz etmektedir. Depolama sistemleri kullanım alanlarına göre değişkenlik gösterse de bu çalışmada, tek paletli raf sistemi, sırt sırta raflar, birim yük OD/ÇS ve derin OD/ÇS olarak belirlenmiştir. OD/ÇS sistemleri bilgisayar desteğinin alındığı sistemlerdir.

Depolar, ürünlerin dağıtımını esnasında kullanılan geçici yığın merkezleridir. Depolar, tedarik zincirlerinin belirlenen amaçlar doğrultusunda işleminde ve lojistik faaliyetlerinin aktif olarak sürdürülmesinde önemli rol oynarlar. Depolar, üretim yapılan tesislerin içinde ya da yanında olabileceği gibi ayrı hususi olarak inşa edilmiş yapılar halinde de olabilirler [4]. Depolama aktiviteleri, hammaddenin temininden üretim süreçlerine dahil olmasına, süreçlerden çıktı olarak ortaya çıkan ürünlerin müşterilere arz edilmesine kadar gerçekleşen bir dizi aşamayı kapsayan faaliyetlerdir. Küreselleşmenin etkisiyle depo faaliyetleri piyasada maliyet kalemi olmaktan ziyade karlılığa etki eden önemli bir faktör haline gelmiştir [5]. Bu aşamada bir deponun verimli ve etkin bir şekilde çalışabilmesi, işletmelerde ürüne uygun seçilen depolama sistemine ve bu sistemin etkin kullanımına bağlıdır. Uygun depolama sistemine karar vermek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır.

Yılmaz [6], çalışmasında OD/ÇS seçiminde ÇKKV metotlarından Gerçekliği Yansıtan Eleme ve Seçim (ELECTRE) ve İdeal Çözüme Benzerlik. Bakımından Sıralama Performansı Tekniği (TOPSIS) yöntemlerini kullanmışlardır. Çalışmasında üç adet alternatif ve üç adet kriter kullanmıştır. Kriterleri verimlilik, ilk yatırım maliyeti ve gerekli depo alanı olarak belirtmişlerdir. Triantaphyllou'nun [7] çok sayıda alternatif ve az sayıda kriterin bulunduğu koşullarda ELECTRE'nin etkili olduğunu aktarmıştır. İkinci aşamada TOPSIS yöntemiyle ise en iyi alternatifin seçilmesinde başarıya ulaştığını belirtmiştir. Aktepe ve Ersöz [8], çalışmalarındaki depo yeri seçim modelini, mamullerin dağıtım ağı verimliliğini artırmak ve lojistik maliyetlerini en aza indirmek amacıyla tasarlamışlardır. Depo seçim problemi doğrultusunda Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP), VlseKriterijuska Optimizacija I Komoromisno Resenje (VIKOR) ve MOORA yöntemi olmak üzere 3 ayrı yöntemden faydalanmışlardır. AHP metodu ile kriterleri ağırlıklandırıp, VIKOR ve MOORA metodları ile alternatiflerin sıralamasını yapmışlardır. Karmaker ve Saha [9], depo yer seçim probleminin kriterlerini incelemişlerdir. AHP yöntemini kullanarak sektör ağırlıklarını belirlemişlerdir. TOPSIS ve Bulanık TOPSIS yöntemleri ile karşılaştırmalı olarak uygun alternatifleri sıralamışlardır. Öztürkoğlu [10], birim yüklü depoların koridor tasarımlarının çoğunun deponun alt kısmında merkezi olarak konumlanan tek bir giriş/çıkış noktasından gelen komutla ilerlediğini söylemiştir ve çalışmasında değişen sayıda giriş/çıkış noktasının hem düzen hem de mesafe üzerindeki etkisini araştırmıştır. Sayın ve Maden [11], otomotiv yedek parça satışı gerçekleştiren bir işletmede analizler yaparak depolama ve depo tasarımının önemini ve işletme verimliliği üzerindeki payını incelemişlerdir. Firmada %52,5 oranında depolama alanı kullanıldığını geriye kalan alanların ise istifleme araçlarının hareketi için ayrıldığını söylemişlerdir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde oto cam sektöründe depolama sistem seçimine çok rastlanmamıştır. ÇKKV yöntemleri ile bu sektör için seçim yapılmıştır.

Bu çalışmada, oto cam üreten bir işletmede bitmiş mamul için kullanılacak uygun depolama sisteminin seçilmesi amaçlanmıştır. Böylece hem işletme içindeki alan etkin bir şekilde kullanılmış olacak hem de mamul takibi kolaylıkla yapılabilecektir. Bu kapsamda ilk olarak bir malzeme taşıma sisteminin seçiminde dikkate alınan kriterler belirlenmiş, işletme koşullarına ve mamule uygun olarak belirlenen dört farklı depolama sistemi alternatifi arasından ÇKKV yöntemlerinden SWARA metodu ile kriter ağırlıkları bulunup MOORA yöntemi ile işletmeye için en ideal depolama sistemi seçimi yapılmıştır.

2. YÖNTEM

Bu çalışmada, ilk aşamada ÇKKV yöntemlerinden SWARA yöntemi ile depolama sistemlerini değerlendirmede kullanılacak kriterlerin önem derecelerinin belirlenmesi, ikinci aşamada ise ele alınan depolama sistemlerinin ÇKKV yöntemlerinden MOORA yöntemi ile alternatiflerden biri seçilmiştir.

ÇKKV, birden fazla kriterin aynı anda değerlendirildiği ve en iyi seçimin yapılmasını sağlayan bir yöntemdir. Akılcı bir karar verme sürecinde en uygun seçim, genellikle kısıtlamalar ve yönetimin hedefleri doğrultusunda belirlenir. ÇKKV ile teorik gelişimi ve pratik uygulamalarıyla karar analizi alanında hızlı bir ilerleme kaydetmiştir. Güçlü bir mantık yapısı ve karar belirlemedeki başarısı sayesinde kendini kanıtlamış ve geniş bir uygulama alanı bulmuştur [12].

2.1. SWARA Yöntemi

SWARA yöntemi, uzman görüşlerinin sürece kolaylıkla entegre edilebilmesine olanak tanıyan ve basit görelî karşılaştırmaların kullanılabildiği bir araçtır. Kriterlerin ağırlıklarının hesaplanması ve önem derecelerinin belirlenmesinde uzmanların görüşleri büyük bir rol oynamaktadır [13].

Yöntemde, alternatiflerin değerlendirilmesinde kullanılacak kriterler önem derecesine göre önemli olandan önemsiz olana doğru sıralanmaktadır. Kriterlerin önem ağırlıkları hesaplanırken, her bir karar vericinin skoru dikkate alınmaktadır [14]. SWARA yönteminin adımları aşağıdaki gibidir [15]:

Adım 1: Problemlerle ilgili kriterler ve karar vericilerden oluşan uzmanlar ayarlanır. Problemin n adet kritere ($C_j, j=1,2,\dots,n$) ve k adet karar verici ($KV_k, k=1,2,\dots,K$) bulunduğu varsayılmaktadır.

Adım 2: Bu adımda, her bir KV, kendi deneyim ve bilgilerine dayanarak kriterleri değerlendirir. En iyi olandan en kötü olana doğru sıralamada C_1 en iyi kriteri, C_n ise en kötü kriteri ifade etmektedir.

Adım 3: KV'ler en önemli kritere 1,00 puanını verir. Diğer kriterlere verilen puanlar, en önemli kriter referans alınarak birbiri ile karşılaştırmalı olarak gerçekleştirilir. Tüm puanlar, 0 ile 1 arasında ve 5'in katları olacak şekilde verilir. KV'ler arasında yapılan karşılaştırmalı ağırlıkların ortalamalarının alınması ile her bir kriter için karşılaştırmalı ağırlıkların ortalamaları (S_j) belirlenir.

Adım 4: Her bir kriter için Eşitlik (1)'de gösterildiği şekilde bir katsayı (k_j) hesaplanmaktadır.

$$k_j = \begin{cases} 1, & j = 1 \\ S_j + 1, & j > 1 \end{cases} \quad (1)$$

Adım 5: Eşitlik (2) kullanılarak her bir kriter için ağırlık (w_j) değeri hesaplanır. Kriterlerin ortak sıralamasında en önemli kriterin (w_1) değeri 1'dir.

$$w_j = \begin{cases} 1, & j = 1 \\ \frac{w_{j-1}}{k_j}, & j > 1 \end{cases} \quad (2)$$

Adım 6: Bir önceki adımda bulunan kriter ağırlıkları (w_j), kriter ağırlıkları toplamına bölünerek Eşitlik (3)'ten yararlanılarak her bir kriterin nihai ağırlıkları (q_j) hesaplanmaktadır.

$$q_j = \frac{w_j}{\sum w_j} \quad (3)$$

2.2. MOORA Yöntemi

MOORA yöntemi, çok amaçlı optimizasyon problemlerinde kullanılmaktadır. ÇKKV yöntemlerinden biri olan MOORA işlem adımlarının farklılaştırılması ile Oran Yaklaşımı, Referans Noktası Yaklaşımı, Önem Katsayısı ve Tam Çarpım Formu ve MULTI-MOORA olarak literatürde yer almaktadır. Bu yöntemler esas olarak Tam Çarpım Formu hariç diğerleri Oran Metodu ile başlar [16].

2.2.1. MOORA-Oran Yaklaşımı

Adım 1: Amaçların tanımlanması ve çeşitli seçeneklerin bu amaçlara göre performans değerleri için Eşitlik (4)'de verilen matris oluşturulur. Bu matriste x_{ij} , i . alternatifin j . amaca veya kritere göre performans değerini ifade eder. m , alternatiflerin sayısını; n ise kriterlerin sayısını ifade eder. Karar matrisinde satırlarda alternatifler, sütunlarda kriterler yer alır.

$$x = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Adım 2: Kriterlerin maksimum ya da minimum amaca yönelik olduğuna bakılmaksızın Eşitlik (5) kullanılarak normalleştirme işlemi gerçekleştirilir.

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (5)$$

x_{ij}^* , i . alternatifin j . kritere göre normalleştirilmiş performans değerini verir. x_{ij}^* değerleri genellikle $[0, 1]$ aralığındadır fakat bazı durumlarda $[-1, 1]$ aralığında da değer alabilmektedir [16].

Adım 3: Normalleştirilmiş maksimizasyon değerlerinin toplamından, normalleştirilmiş minimizasyon değerlerinin toplamı çıkarılır. Eşitlik (6)'da belirtilen formül yardımıyla gerçekleştirilir.

$$y_i^* = \sum_{j=1}^g x_{ij}^* - \sum_{j=g+1}^n x_{ij}^* \quad (6)$$

g , maksimizasyonu amaçlanan kriterlerin sayısını, n , minimizasyonu amaçlanan kriterlerin sayısını ve y_i^* ise i . alternatifin tüm kriterlere göre normalleştirilmiş değerini göstermektedir. y_i^* değerleri büyükten küçüğe doğru sıralanır. Bu sıralamaya göre birinci sıradaki seçenek en ideal seçenek olarak belirlenir.

2.2.2. MOORA-Referans Noktası Yaklaşımı

Referans noktası yaklaşımında, alternatiflerin her bir kritere göre en yüksek değerleri maksimizasyon durumunda, en düşük değerleri ise minimizasyon durumunda referans noktası (r_i) olarak seçilir. Eşitlik (7)'ten faydalanarak, her bir alternatifin her kritere göre referans noktasına olan uzaklıkları hesaplanır. r_i , i . alternatifin referans noktasını ifade eder.

$$d_{ij} = |r_i - x_{ij}^*| \quad (7)$$

Eşitlik (8) kullanılarak alternatiflerin sıralaması yapılır. Her alternatif için en yüksek değer (p_i) hesaplanır. Alternatifler küçükten büyüğe doğru sıralanır. İlk sıradaki alternatif en uygun alternatif olarak seçilir.

$$p_i = \min_j (max_j d_j) \quad (8)$$

2.2.3. MOORA-Önem Katsayısı Yaklaşımı

MOORA-Oran yaklaşımı ile ulaşılan normalleştirilmiş değerler temel alınır. Kriterlerin ağırlık (öncelik) farklılıkları dikkate alındığında alternatiflerin performans değerleri Eşitlik (9) ile hesaplanır. Kriterlerin ağırlıkları w_j ile gösterilmektedir.

$$y_i^* = \sum_{j=1}^g w_j x_{ij}^* - \sum_{j=g+1}^n w_j x_{ij}^* \quad (9)$$

y_i^* değerleri büyükten küçüğe sıralanır ve bu sıralamadaki birinci sırada olan alternatif en uygun alternatif olarak seçilir.

2.2.4. MOORA-Tam Çarpım Yaklaşımı

Her bir alternatifin maksimizasyon amaçlı değerleri çarpılarak, minimizasyon amaçlı değerlerin çarpımına bölünmektedir. Eşitlik (10)'da görüldüğü şekilde hesaplanır.

$$U_i = \frac{A_i}{B_i} \quad (10)$$

A_i ve B_i değerleri de Eşitlik (11) ve (12) kullanılarak bulunur.

$$A_i = \prod_{g=1}^j x_{gj} \quad (11)$$

$$B_i = \prod_{k=j+1}^n x_{kj} \quad (12)$$

i alternatiflerin sayısını, j maksimizasyon kriterlerinin sayısını, n minimizasyon kriterlerinin sayısını, U_i alternatiflerin skorlarını ifade etmektedir. Skor değerleri büyükten küçüğe sıralanır ve bu sıralamadaki birinci alternatif en ideal alternatif olarak seçilir.

2.2.5. MULTIMOORA Yaklaşımı

MOORA yaklaşımlarının sonuçlarında yapılan alternatiflerin sıralaması toplu halde değerlendirilmektedir. MULTIMOORA için baskınlık karşılaştırması yapılarak alternatifler sıralamaya konulmaktadır [17].

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Uygulama, oto cam sektöründe üretimini devam ettiren bir firmada gerçekleştirilmiştir. Firma, 1988 yılında otomotiv sektörünün lamine cam ihtiyacını karşılamak üzere kurulmuştur. Firmada yurt dışı için üretilen ürünlerin sevkiyata hazır hale gelmesi için camlara sandıklama işlemi yapılmaktadır. Fakat sandıkların depolama işlemi sistemli bir şekilde yapılamamakta, istif yöntemiyle muhafaza edildiği için depodaki camların izlenebilirliği sağlıklı şekilde sağlanamamaktadır. Bu problemin önüne geçebilmek, hem var olan alanı etkili şekilde kullanıp hem camların izlenebilirliğini sağlayabilmek için firmaya en uygun depolama sisteminin seçilmesi hedeflenmiştir.

3.1. SWARA Yöntemi ile Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi

Literatüre göre depolama faaliyetleri için dikkate alınması gereken kriterler sistem hızı ve gerekli alan [18], entegrasyon ve ürün çeşitliliği [19] olarak belirlenmiştir. Şekil 1'de kriterler ve alternatifler gösterilmiştir.



Şekil 1. Kriterler [18,19] ve alternatifler görseli

SWARA metodu ile kriterlerin önem ağırlıklarının belirlenir. Firmada çalışan 3-5 yıl deneyimli mühendislerden oluşan ekipten beyin fırtınası tekniği ile skorlar alınmıştır. KV olarak seçilen mühendisler ve bu KV'ler kriterleri en önemli kriterden başlayarak entegrasyon, gerekli alan, sistem hızı ve ürün çeşitliliği olarak sıralamışlardır. En önemli kriter seçilen entegrasyon kriteri 1,00 puanını almış ve diğer kriterlerin karşılaştırmalı ağırlığı Çizelge 1'de gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

Çizelge 1. Karar vericilerin değerleri

Kriterler	KV1	KV2	KV3
Entegrasyon	1,00	1,00	1,00
Gerekli alan	0,80	0,85	0,75
Sistem hızı	0,40	0,70	0,50
Ürün çeşitliliği	0,20	0,25	0,30

Kriterlerin göreceli önem ağırlıklarının ortalamaları alınmış ve S_j değerleri bulunmuştur. Eşitlik (1)'i kullanarak her bir kriterin katsayısı olan (k_j) değeri hesaplanmıştır. Eşitlik (2) ve Eşitlik (3) kullanılarak da kriterlerin önem ağırlıkları hesaplanmış ve bu değerler Çizelge 2'de gösterilmiştir.

Çizelge 2. SWARA metoduna ilişkin değerler

Kriterler	S_j	k_j	w_j	q_j
Entegrasyon	1,00	1,00	1,00	0,45
Gerekli alan	0,80	1,80	0,56	0,25
Sistem hızı	0,53	1,53	0,36	0,16
Ürün çeşitliliği	0,25	1,25	0,29	0,13

Tüm kriterlerin önem ağırlıklarının değerleri (q_j) SWARA metodu ile hesaplanarak MOORA-Önem Katsayısı yaklaşımında önem ağırlıkları (w_j) olarak kullanılmıştır.

3.2. MOORA Yöntemi ile Depolama Sistemi Seçimi

Bu aşamada, uygulama yapılan firmanın isteklerine en uygun depolama sisteminin MOORA yöntemi kullanılarak seçim yapılmaktadır. Alternatifler için kriter puan değerleri karar vericiler ile görüşülerek tek paletli raf sistemi, sırt sırta raflar, birim yük OD/ÇS ve derin OD/ÇS olarak belirlenmiştir. Bu değerler Çizelge 3'te görülmektedir. Kriterlerden gerekli alanının minimizasyonu; sistem hızı, entegrasyon ve ürün çeşitliliğinin ise maksimizasyonu amaçlanmaktadır.

Çizelge 3. Karar matrisi

Alternatifler	Gerekli alan	Sistem hızı	Entegrasyon	Ürün çeşitliliği
Tek paletli raf sistemi	7	9	6	6
Sırt sırta raflar	4	5	5	4
Birim yük OD/ÇS	5	7	8	9
Derin OD/ÇS	6	6	7	3

Karar matrisindeki değerlere Eşitlik (5)'teki işlemler uygulanarak normalize edilmiş karar matrisi elde edilir (Çizelge 4). MOORA Metodundaki; Oran Sistemi, Referans Noktası ve Önem Katsayısı yaklaşımları için Çizelge 4'teki değerler kullanılmaktadır.

Çizelge 4. Normalize edilmiş karar matrisi

Alternatifler	Gerekli Alan min	Sistem Hızı max	Entegrasyon max	Ürün Çeşitliliği max
Tek paletli raf sistemi	0,624	0,651	0,455	0,504
Sırt sırta raflar	0,356	0,362	0,379	0,336
Birim yük OD/ÇS	0,445	0,507	0,606	0,755
Derin OD/ÇS	0,535	0,434	0,531	0,252

3.2.1. Oran Sistemi Yaklaşımı ile Uygun Alternatifin Seçilmesi

Oran Sistemi yaklaşımında maksimizasyonu ve minimizasyonu istenen kriterlerin alternatiflerdeki değerleri toplanır. Bu işlemten sonra Eşitlik (6)'daki gibi hesaplanmaktadır.

Çizelge 5. Oran sistemi yaklaşımı

Alternatifler	Minimizasyon toplamı	Maksimizasyon toplamı	Fark
Tek paletli raf sistemi	0,624	1,610	0,986
Sırt sırta raflar	0,356	1,077	0,720
Birim yük OD/ÇS	0,445	1,868	1,423
Derin OD/ÇS	0,535	1,217	0,682

Çizelge 5'te görülen Oran Sistemi Yaklaşımının uygulanması ile elde edilen fark sonuçları en büyükten en küçüğe; Birim Yük OD/ÇS, Tek Paletli Raf Sistemi, Sırt Sırta Raflar ve Derin OD/ÇS olarak sıralanır. Oran Sistemi yaklaşımı sonucunda depolama sistemi için en uygun alternatifin Birim Yük OD/ÇS olduğu görülmektedir.

3.2.2. Referans Noktası Yaklaşımı ile Uygun Alternatifin Seçilmesi

Bu yaklaşımda ilk olarak referans noktası belirlenir. Çizelge 4'teki değerler kullanılarak minimizasyonu amaçlanan kriterin sütunundaki en küçük değer, maksimizasyonu amaçlanan kriterlerin sütunlarındaki en büyük değerler o kriterler için referans noktalarını belirtmektedir [20]. Bu değerler Çizelge 6'da gösterilmektedir.

Çizelge 6. Referans noktaları

Kriterler	Referans noktası
Gerekli alan	0,356
Sistem hızı	0,651
Entegrasyon	0,606
Ürün çeşitliliği	0,755

Referans Sistemi yaklaşımına göre en ideal depolama sisteminin seçilebilmesi için Eşitlik (7) ve Eşitlik (8)'den yararlanılır. Çizelge 4'deki her kriter değerinden Çizelge 6'deki referans noktası değerleri çıkarılmalıdır. Çizelge 7 incelendiğinde alternatifler küçükten büyüğe doğru Birim Yük OD/ÇS, Tek Paletli Raf Sistemi, Sırt Sırta Raflar ve Derin OD/ÇS olarak sıralanır. Bu sıralama sonucunda Birim Yük OD/ÇS Referans Noktası yaklaşımına göre en ideal alternatif seçilir.

Çizelge 7. Referans noktası yaklaşımı sonuçları

Alternatifler	Maksimum toplam
Tek paletli raf sistemi	0,267
Sırt sırta raflar	0,420
Birim yük OD/ÇS	0,145
Derin OD/ÇS	0,504

3.2.3. Önem Katsayısı Yaklaşımı ile Uygun Alternatifin Seçilmesi

Bu yaklaşımda SWARA yöntemi ile ulaşılan kriterlerin önem ağırlıkları ile normalize edilmiş hali Çizelge 4'teki değerler ile çarpılır. Bu işlemde elde edilen değerler ve Eşitlik (9) kullanılarak y_i^* değerleri hesaplanır ve Çizelge 8 elde edilir. Çizelge 8'de Önem Katsayısı Yaklaşımı sonuçları yer almaktadır.

Çizelge 8. Önem katsayısı yaklaşımı sonuçları

Alternatifler	y_i^*
Tek paletli raf sistemi	0,222
Sırt sırta raflar	0,185
Birim yük OD/ÇS	0,345
Derin OD/ÇS	0,210

Çizelge 8'de ulaşılan değerler büyükten küçüğe doğru Birim Yük OD/ÇS, Tek Paletli Raf Sistemi, Derin OD/ÇS, Sırt Sırta Raflar olarak sıralanmaktadır. Bu sıralama doğrultusunda Birim Yük OD/ÇS, Önem Katsayısı yaklaşımına göre en uygun alternatif olarak seçilmektedir.

3.2.4. Tam Çarpım Yaklaşımı ile Uygun Alternatifin Seçilmesi

Tam Çarpım Yaklaşımında, Eşitlik (10), (11) ve (12)' ye göre hesaplanmaktadır. Çizelge 9'da elde edilen max/min değerlerine karşılık gelen alternatifler büyükten küçüğe doğru Birim Yük OD/ÇS, Tek Paletli Raf Sistemi, Sırt Sırt Raflar, Derin OD/ÇS olarak sıralanmaktadır. Tam Çarpım yaklaşımına göre en uygun alternatif Birim Yük OD/ÇS olarak seçilmektedir.

Çizelge 9. Tam çarpım yaklaşımı sonuçları

Alternatifler	min Gerekli alan	max Sistem hızı	max Entegrasyon	max Ürün çeşitliliği	max/min
Tek paletli raf sistemi	7	9	6	6	46,29
Sırt sırt raflar	4	5	5	4	25,00
Birim yük OD/ÇS	5	7	8	9	100,80
Derin OD/ÇS	6	6	7	3	21,00

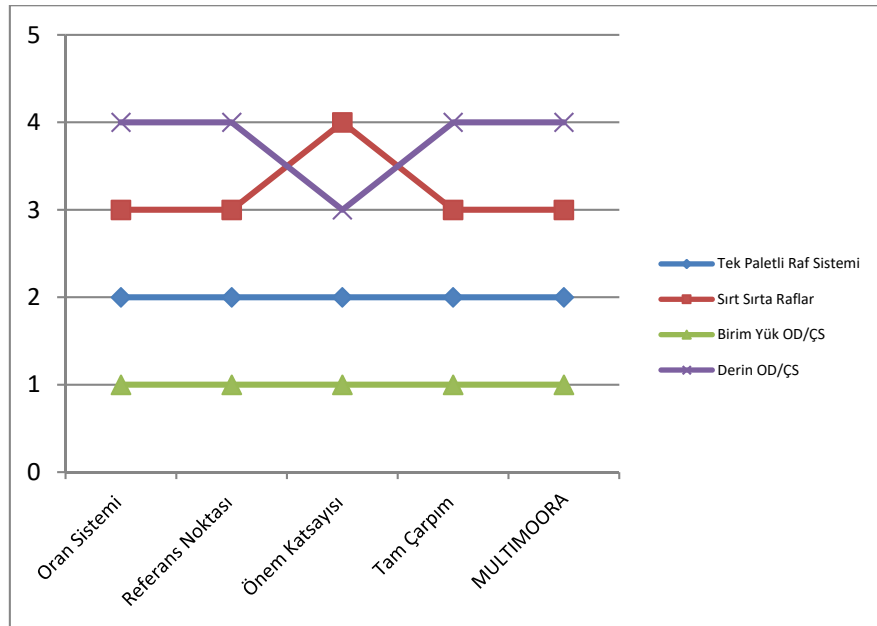
3.2.5. MULTIMOORA Metodu ile Baskınlık Karşılaştırması

Oran Sistemi yaklaşımı, Referans Noktası Yaklaşımı, Önem Katsayısı Yaklaşımı ve Tam Çarpım yaklaşımı ile yapılan sıralamalar bütünlük olarak değerlendirilir ve MULTIMOORA metodunda baskınlık karşılaştırması yapılarak sıralama oluşturulur. Bu sıralamaya Çizelge 10'da yer verilmiştir.

Çizelge 10. Baskınlık karşılaştırma sonuçları

Alternatifler	Oran sistemi yaklaşımı	Referans noktası yaklaşımı	Önem katsayısı yaklaşımı	Tam çarpım yaklaşımı	MULTIMOORA
Tek paletli raf sistemi	2	2	2	2	2
Sırt sırt raflar	3	3	4	3	3
Birim yük OD/ÇS	1	1	1	1	1
Derin OD/ÇS	4	4	3	4	4

MULTIMOORA metoduna göre en uygun alternatif Birim Yük OD/ÇS olarak belirlenmiştir. En uygun olan alternatiften en uygun olmayan alternatife doğru olan sıralamanın Birim Yük OD/ÇS, Tek Paletli Raf Sistemi, Sırt Sırt Raflar, Derin OD/ÇS şeklinde olduğu görülmektedir. Şekil 2'de grafik olarak yöntemlerin karşılaştırılması gösterilmiştir. En iyi seçimin Birim Yük OD/ÇS olduğu görülmüştür.



Şekil 2. Yöntemlerin karşılaştırılması

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, oto cam sektöründeki depolama sistemi uygulaması için öncelikle SWARA yöntemiyle kriterlerin ağırlıkları belirlenmiş sonrasında MOORA yöntemi ile alternatifler arasından seçim yapılmıştır. Birim Yük OD/ÇS tüm yaklaşımlarda en ideal depolama sistemi olarak seçilmiştir. Önem Katsayısı yaklaşımı hariç diğer yaklaşımlarda en uygun olan alternatiften başlayan sıralama Birim Yük OD/ÇS, Tek Paletli Raf Sistemi, Sırt Sırt Raflar, Derin OD/ÇS şeklindedir. Problem Önem Katsayısı yaklaşımı ile çözüldüğünde en uygun olan alternatiften başlayan sıralama Birim Yük OD/ÇS, Tek Paletli Raf Sistemi, Derin OD/ÇS, Sırt Sırt Raflar şeklinde olmaktadır. ÇKKV yöntemleri uygulamalarda değiştirilerek farklı sonuçlar ve sıralamalar verebilmektedir. Firmalar için değişen sonuçlara göre işletmenin ihtiyacına ve uygulanacak sistemin maliyeti düşünülerek karar vermesi amaçlanmaktadır. Çalışmanın devamında sektörler ve ürünler için alternatif çeşitleri ve sayıları, kriterler ve karar vericiler değiştirilerek farklı ÇKKV yöntemlerinin uygulanması ve karar problemlerinin çözülmesi mümkündür.

5. KAYNAKLAR

1. Özdemir, A.İ. (2004). Tedarik zinciri yönetiminin gelişimi, süreçleri ve yararları. *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 23, 87-96.
2. Oğuz, İ.H. ve Oğuz, D. (2020). Türkiye ekonomisinde lojistik. *Uluslararası İşletme ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi*, 1(2), 65-74.
3. Yıldıztekin, A. (2004). Tekstil sektöründe lojistik uygulamalar ve Çin. *Ambar Dergisi*, 5, 4-5.
4. Ertek, G. (2012). Depolama sistemleri (warehousing systems). *Uluslararası Lojistik, Anadolu Üniversitesi Yayınları, Açıköğretim Fakültesi Yayını*, 1593, 19-20.
5. Sargın, K. ve Öztürkoğlu, Y. (2020). Depo çalışanlarının bilişim sistemlerine yaklaşımları üzerine bir araştırma. *Manas Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 9(3), 1762-1772.
6. Yılmaz, O. (2011). Otomatik depolama ve çekme sistemlerinin çok kriterli karar verme yöntemleriyle seçimi ve uygulaması. *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Sistem Mühendisliği Programı, İstanbul.
7. Triantaphyllou, E. (2000). Multi-criteria decision making methods: a comparative study. Kluwer Academic Publishers, Boston.
8. Aktepe, A. ve Ersöz, S. (2014). Ahp-Vikor ve Moora yöntemlerinin depo yeri seçim probleminde uygulanması. *Endüstri Mühendisliği*, 25(1), 2-15.
9. Karmaker, C. ve Saha, M. (2015). Optimization of warehouse location through fuzzy multi-criteria decision making methods. *Decision Science Letters*, 4(3), 315-334.
10. Öztürkoğlu, Ö. (2016). Effects of varying input and output points on new aisle designs in warehouses. *In 2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, July, 3925-3932.
11. Sayın, A.A. ve Maden, M. (2020). Otomotiv yedek parça firmasında depo tasarım faaliyetlerinin işletme verimliliğine etkisi. *Avrasya Sosyal ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi*, 7(2), 91-109.
12. Güneş, M. ve Umurusman, N. (2003). Bir karar destek aracı bulanık hedef programlama yerel yönetimlerde vergi optimizasyonu uygulaması. *Rewiev of Social Economic & Busisness Studies*, (2), 242- 255.
13. Derse, O. ve Yontar, E. (2020). SWARA-TOPSIS yöntemi ile en uygun yenilenebilir enerji kaynağının belirlenmesi. *Endüstri Mühendisliği*, 31(3), 389-419.
14. Yurdoğlu, H. ve Kundakçı, N. (2017). SWARA ve WASPAS yöntemleri ile sunucu seçimi. *Bahkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 20(38), 253-270.
15. Adalı, E.A. ve Işık, A.T. (2017). Bir tedarikçi seçim problemi için Swara ve Waspas yöntemlerine dayanan karar verme yaklaşımı. *International Review of Economics and Management*, 5(4), 56-77.
16. Ersöz, F. ve Atay, A. (2011). Çok kriterli karar verme problemlerinde MOORA yöntemi. *YAEM2011 Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği 31. Ulusal Kongresi*, Sakarya Üniversitesi, 31, 78-87.
17. Ceyhan, İ.F. ve Demirci, F. (2017). MULTIMOORA yöntemiyle finansal performans ölçümü: leasing şirketlerinde bir uygulama. *Bartın Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 8(15), 277-296.
18. Roodbergen, K.J. and Vis, I.F. (2009). A survey of literature on automated storage and retrieval systems. *European Journal of Operational Research*, 194(2), 343-362.
19. Acar, Z. ve Çakmak, E. (2013). Depolama ve depo yönetimi. Nobel Akademik Yayıncılık, 3. Basım. Ankara.
20. Şimşek, A. ve Çatır O. (2020). MOORA yöntemi ile ürün seçimi: turizm sektöründe bir uygulama. *Electronic Journal of Social Sciences*, 19(74), 549-563.



Distribution Network Reconfiguration for Voltage Profile Enhancement and Power Loss Reduction Under Hourly Energy Consumption Using Quantum Approximate Optimization Algorithm

Nisa NACAR ÇIKAN^{1,a}

¹Çukurova University, Faculty of Engineering, Department of Electrical & Electronics Engineering, Adana, Türkiye

^aORCID: 0000-0002-9641-4616

Article Info

Received : 01.01.2025

Accepted : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665857

Corresponding Author

Nisa NACAR ÇIKAN

ncikan@cu.edu.tr

Keywords

Reconfiguration

Dynamic power distribution networks

Power loss minimization

Metaheuristic algorithm

How to cite: NACAR ÇIKAN, N., (2025). Distribution Network Reconfiguration for Voltage Profile Enhancement and Power Loss Reduction Under Hourly Energy Consumption Using Quantum Approximate Optimization Algorithm. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(1), 79-87.

ABSTRACT

This paper presents a dynamic reconfiguration of a 33-bus power distribution network using the Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA). The primary objectives are voltage profile improvement and power loss minimization, critical factors for enhancing the overall performance and efficiency of distribution networks. The proposed method adapts to hourly load variations, utilizing real consumer load profiles to account for dynamic changes throughout the day. By incorporating QAOA into the reconfiguration process, the system explores optimal configurations that reduce losses and improve voltage stability under varying operational conditions. The study's findings demonstrate the effectiveness of this approach in dynamically optimizing power distribution networks, contributing to reliable and efficient energy systems.

Kuantum Yaklaşık Optimizasyon Algoritması Kullanılarak Saatlik Enerji Tüketimi Altında Güç Kaybının Azaltılması ve Gerilim Profiline İyileştirilmesi için Dağıtım Şebekesinin Yeniden Yapılandırılması

Makale Bilgileri

Geliş : 01.01.2025

Kabul : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665857

Sorumlu Yazar

Nisa NACAR ÇIKAN

ncikan@cu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Yeniden yapılandırma

Dinamik güç dağıtım ağları

Güç kaybı minimizasyonu

Metasezgisel algoritmalar

Atf şekli: NACAR ÇIKAN, N., (2025). Kuantum Yaklaşık Optimizasyon Algoritması Kullanılarak Saatlik Enerji Tüketimi Altında Güç Kaybının Azaltılması ve Gerilim Profiline İyileştirilmesi için Dağıtım Şebekesinin Yeniden Yapılandırılması. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(1), 79-87.

ÖZ

Bu çalışmada, Kuantum Yaklaşık Optimizasyon Algoritması (QAOA) kullanarak 33 baralı bir elektrik dağıtım şebekesinin dinamik olarak yeniden yapılandırılması gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, dağıtım şebekelerinin genel performansını ve verimliliğini artırmak için kritik faktörler olan güç kaybı minimizasyonu ve voltaj profiline iyileştirilmesidir. Önerilen yöntem, gün boyunca dinamik değişiklikleri hesaba katarak ve gerçek tüketici yük profillerini kullanarak saatlik yük değişimlerine uyum sağlar. Sistem, OAQA'yı yeniden yapılandırma sürecine dahil ederek, değişen operasyonel koşullar altında kayıpları azaltan ve voltaj kararlılığını artıran optimum yapılandırmaları araştırmıştır. Çalışmanın bulguları, bu yaklaşımın elektrik dağıtım şebekelerini dinamik olarak optimize etmedeki etkinliğini göstermekte ve güvenilir ve verimli enerji sistemlerine katkıda bulunmaktadır.

1. INTRODUCTION

The power distribution network (PDN) is designed to minimize line losses while maintaining bus voltage levels within specified limits during the transmission of electrical energy. In the face of load fluctuations or grid malfunctions, it is imperative that active losses and bus voltage levels remain within acceptable parameters. This can be achieved through the strategic modification of switching positions within the PDN. The process of adapting the switching arrangements in response to changes in the topology of the power system is referred to as reconfiguration [1]. In this context, it is essential to protect the radial structure of the grid while ensuring uninterrupted power supply to consumers connected to the buses. Two types of switches are employed in distribution networks: sectionalizing switches (SSs) and tie-switches (TSs). By optimizing the switching status, the reconfiguration process aims to effectively reduce losses and enhance voltage stability, thereby facilitating reliable operation of the system. The approaches documented in the literature for addressing the distribution network reconfiguration (DNR) problem can be categorized into two main types: deterministic methods and meta-heuristic techniques [1]. Deterministic methods typically employ complex linear and nonlinear programming techniques during the reconfiguration process. However, these approaches often struggle to achieve a global optimal solution when confronted with nonconvex or highly nonlinear problems, which can be challenging to differentiate. As a result, they frequently become trapped in local optima, limiting their effectiveness in finding the best possible configuration [2]. Thus, heuristic and metaheuristic techniques have been introduced as viable alternatives to conventional methods, offering greater flexibility and a higher likelihood of achieving global optimal solutions [3]. In the context of power distribution networks, all studies conducted thus far on the reconfiguration technique for system improvement have been summarized in [4,5]. Recently, a variety of metaheuristic algorithms were applied to the reconfiguration problem in [1], and multiple case studies were considered to identify the algorithm that provides the optimal solution to the problem. Furthermore, the reconfiguration problem has been tackled in [6] by taking into account the unbalanced nature of the PDN [7]. In most of the studies, different optimization algorithms have been evaluated considering peak load conditions and applied to 69-bus and 33-bus PDN.

In this study, the reconfiguration of the 33-bus electrical distribution system was investigated using the Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA). QAOA was chosen due to its ability to efficiently handle combinatorial optimization problems, which are inherent in DNR. Traditional optimization methods often struggle with the increasing complexity and size of modern distribution networks, leading to computational inefficiencies. QAOA leverages quantum mechanics to explore solution spaces more effectively, offering potential advantages in terms of convergence speed and solution quality. Two different scenarios were considered for the distribution grid. In the first scenario, optimal switching positions were determined based on the peak load values derived from the 33-bus test system data. The outcomes were compared with existing literature, thereby assessing the suitability of the QAOA approach for the reconfiguration of PDN. In the second scenario, in contrast to other studies, real-time consumer load profiles were utilized, assuming that the buses experienced variable loads. The system was reconfigured on an hourly basis, taking into account the bus load values. Additionally, the QAOA algorithm was executed 100 times, and the results were evaluated statistically. Key metrics such as the algorithm's elapsed time, losses, and improvements in bus voltage were assessed by identifying the best and worst switching positions. Furthermore, the appropriate inertia weight constant value for the QAOA used in the scenarios was statistically determined for the reconfiguration of the lines.

The remainder of the paper is structured as follows: Section 2 formulates the problem of reconfiguration in PDNs, while Section 3 introduces the QAOA employed in the study. Section 4 presents case studies and discusses the results obtained, finally concluding with a summary in the final section.

2. PROBLEM FORMULATION

In the distribution systems are expected to ensure the minimum level of active power losses and bus voltage within the nominal limits. For this purpose, the objective function of the QAOA is designed and presented in the study.

2.1. Minimization of the Active Power Losses

The active power losses in the PDN with N buses are defined by the Equation (1) [8].

$$P_{loss(i,i+1)} = \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \cdot r_{(i,i+1)} \quad (1)$$

In Equation 1 P_i and Q_i terms are the active and reactive power values in the i^{th} bus, respectively. The $r_{i,i+1}$ term is the line resistance between the branches of i and i+1. V_i refers to bus voltage at the i^{th} node. The total power loss in the distribution grid with N buses and m branches is defined by the Equation 2 [9].

$$P_{losses} = \sum_{i=1}^m k_{(i,i+1)} \cdot \left(\frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \right) \cdot r_{(i,i+1)} \quad (2)$$

A radiality criteria of the PDN is the criterion of $m=N-1$. This criterion always has to be met. The term $k_{i,i+1}$ indicates whether the branch of the distribution line is in energized or not. If the branch is in energized then $k=1$, and in case the switch is off then $k=0$.

2.2. Bus Voltage Limitation

In PDN the bus voltage levels must be within certain limits as shown in Equation 3 [10].

$$V_{min}^i \leq V_{bus}^i \leq V_{max}^i \quad (3)$$

The limit values for the bus voltage are $0.9 \cdot V_{bus}^i \leq V_{bus}^i \leq 1.1 \cdot V_{bus}^i$ pu. The permissible voltage range for the supply nodes is assumed to be $0.95 \cdot V_{feeder}^i \leq V_{feeder}^i \leq 1.05 \cdot V_{feeder}^i$ pu.

2.3. Optimization Constraint

The following constraints should be taken into consideration when determining the optimal switching status criteria in the distribution grid.

2.3.1. Branches Current Limitation

The maximum value of the current must not exceed the current carrying capacity of the line as demonstrated in Equation 4 [10].

$$I_{branches}^i \leq I_{max}^i \quad (4)$$

2.3.2. Preserving the Radial Topological Structure of the Distribution Grid and Radiality Check

PDN are generally designed in a radial structure [11]. The method for ensuring radiality in PDNs is extensively detailed in [12]. Additionally, [12] also discusses how PDNs can transition into a non-radial structure after the integration of distributed generators and presents proposed solutions to address this issue. It is aimed to preserve the radial structure also after changing the position of the switches in the system. Equation 5 refers to the number of switches that must be turned on to provide a radial structure [12].

$$\Lambda = B - N + S \quad (5)$$

where B, N and S are number of branches, bus and feeder, respectively. Actually, this criterion is strongly connected with $m=N-1$. The system must also meet the following conditions to have a radial structure.

- ✓ All loads in the system must be fed by the same feeder.
- ✓ There must be no loop (acyclic) structure in the line.

In this case, the number of SSSs in the PDN is determined using the Equation 6.

$$N_{SSS} = N_{Bus} - 1 \quad (6)$$

The required conditions for preserving the line radiality at the end of the reconfiguration are defined by Equations (5) - (6). Bus incidence matrix [11] must be created to check radiality. The matrix is created using Equation 7.

$$\hat{A} = \begin{cases} -1 \text{ or } 1 & \text{Radial} \\ 0 & \text{Not Radial} \end{cases} \quad (7)$$

If $|\det(A)| = 1$ then the system is radial, and all loads connected to the buses are powered by a single source.

3. QUANTUM APPROXIMATE OPTIMIZATION ALGORITHM

Quantum Approximate Optimization Algorithm is a hybrid quantum-classical algorithm designed to solve combinatorial optimization problems [13]. This algorithm generates solutions over a parametric quantum circuit using both quantum and classical resources. QAOA alternates between phase separator operators (which encode the cost function) and mixing operators (which explore the solution space). These operations are repeated for a given number of layers, and the parameters are tuned by classical optimization methods to achieve the smallest value of the objective function. Mathematically, QAOA uses the problem Hamiltonian H_C and the mixture Hamiltonian H_M to be minimized. For certain parameters $\vec{\gamma}$ and $\vec{\beta}$, the quantum state evolves as follows:

$$|\psi(\vec{\gamma}, \vec{\beta})\rangle = U_M(\beta_p)U_C(\gamma_p) \dots U_M(\beta_1)U_C(\gamma_1)|s\rangle \quad (8)$$

where $U_C(\gamma) = e^{-i\gamma H_C}$ and $U_M(\beta) = e^{-i\beta H_M}$ and $|s\rangle$ is the initial quantum state. The parameters $\vec{\gamma}$ and $\vec{\beta}$ are optimized by classical methods to obtain convergent solutions to the reconfiguration problem of PDNs. This method aims to offer a quantum advantage, especially in large-scale optimization problems, but its full potential will be better understood with the development of quantum hardware.

4. CASE STUDY&RESULTS

A dynamic study to minimize the active power loss using 24-hour variable load profiles is performed by applying it to a 33-bus test system. The load flow analysis of the power system has been performed on an hourly basis using real-time consumer load profiles. Furthermore, the iteration number of the QAOA is set to 100 and the results are statistically evaluated. Algorithm's loop-elapsed-time, power losses and the voltage improvement in PDN are evaluated by determining the best and worst switching positions.

Figure 1 shows the 33-bus power distribution test system. This system includes 1 feeder, 5 TSs (dashed lines), and 32 SSSs. The objective function of the reconfiguration operation is to improve the voltage profile and to reduce the active power losses in the PDN. In the scenario, the system was optimized hourly under dynamic load by preserving the radiality of the distribution system.

Consumer load profiles of the distribution company for the April 2023 period are used to define dynamic loads. Changes in switching positions are examined for 24 hours. The data based on the weekly average load values of residential and commercial consumers are used. The power factor is assumed to be 0.90 and 0.71 for residential and commercial consumers, respectively, with 80% of the total load coming from residential consumers and 20% from commercial consumers.

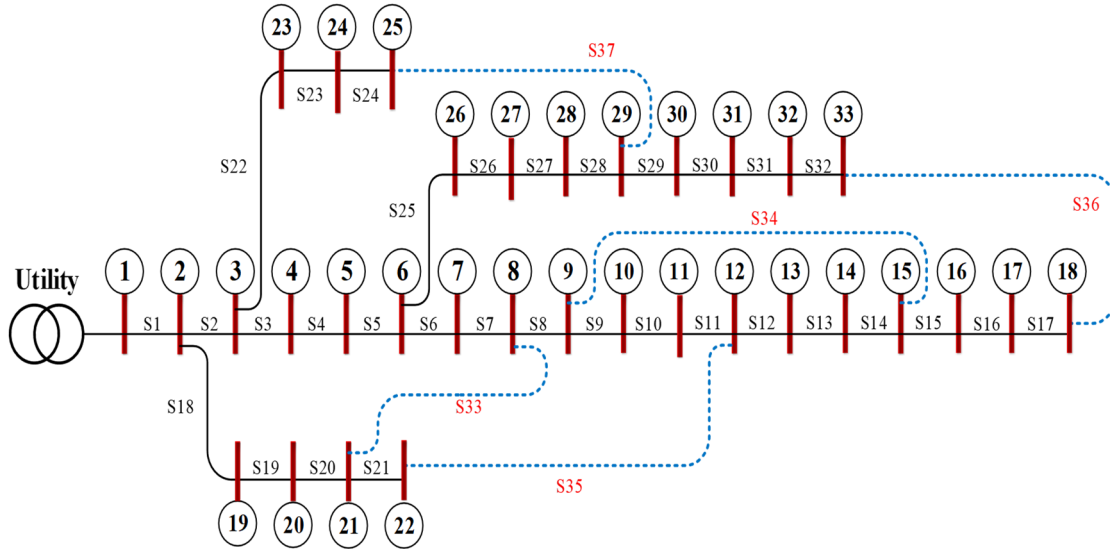


Figure 1. 33-bus test system [1]

4.1. Reconfiguration of 33-Bus Power Distribution Network under Dynamic Load

The configuration of the system remains unchanged even when the loads connected to the bus decrease or increase linearly in relation to the peak load. In order to create the dynamic structure, the number of consumers assigned to each bus is randomly determined. The load variations of the 33-bus system are defined on an hourly basis, and the consumers' load data used to determine the dynamic structure can be seen in Figure 2 and Figure 3.

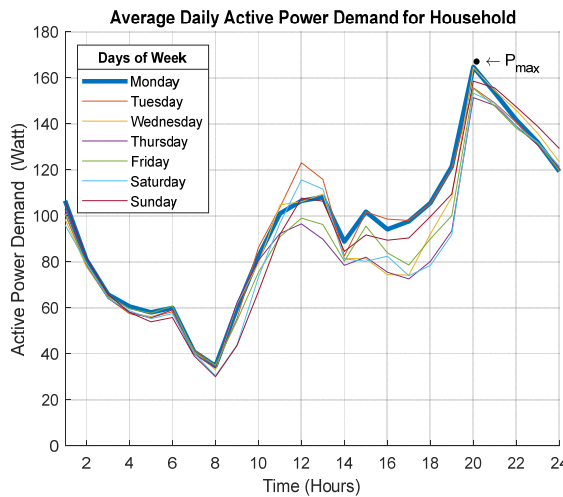


Figure 2. Weekly load profile of real residential consumers provided by the distribution company for the month of April

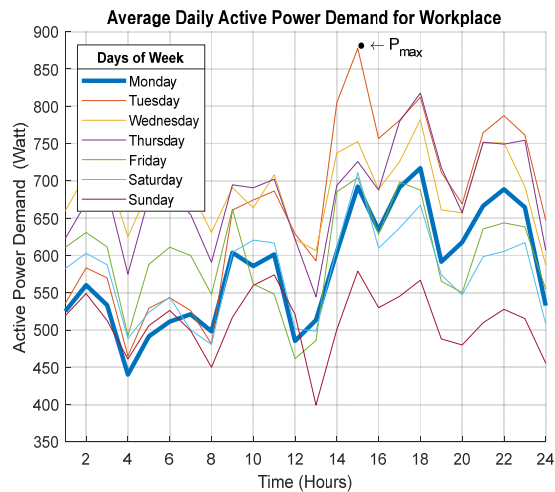


Figure 3. Weekly load profile of real commercial consumers provided by the distribution company for the month of April

The numbers of residential and commercial consumers connected to the buses are randomly assigned, and their variations for different periods are graphically displayed in Figure 4 and Figure 5. For example, Figures 4 and Figure 5 show that the numbers of residential and commercial consumers connected to the bus 10 at 04:00 pm are 400 and 20, respectively.

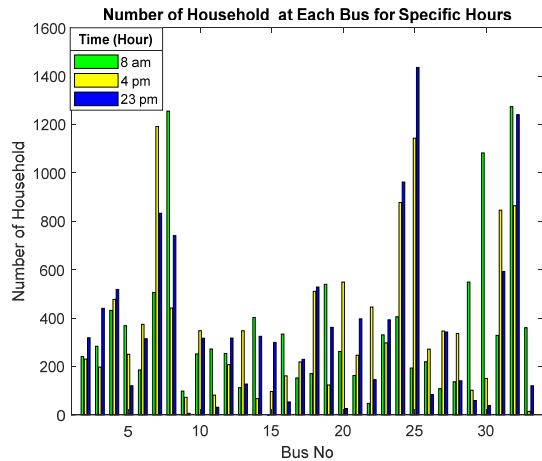


Figure 4. Number of residential consumers randomly assigned to buses for different time zones

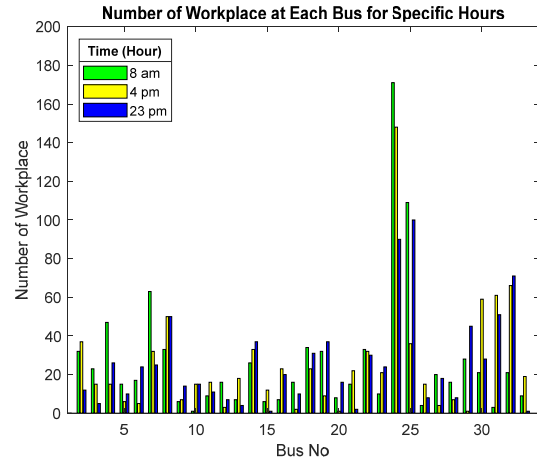


Figure 5. Number of randomly assigned workplace consumers belonging to different buses

Table 1 shows the hourly demanded power values, line power losses, the lowest bus voltage level in the case of TSs (33, 34, 35, 36, and 37) are constant. Table 2 and Table 3 show the analysis after reconfiguration under the same loading condition.

Table 1. Power losses, min bus voltage and power factor results before optimization algorithm

Time interval	Initial open switches	Source power $\Sigma P_{gen} + jQ_{gen}$ (MW + jMVar)	P.F. of feeder $\cos(\phi)$	Demand power $\Sigma P_{load} \Sigma Q_{load}$ (MW + jMVar)	P.F. of All Buses $\cos(\phi)$	Total power losses $\Sigma P_{loss} + jQ_{loss}$ (kW + jkVar)	Minimum voltage V_{min} (pu)	Bus number for V_{min}
00	33-34-35-36-37	1.6497+j1.0115	0.8525	1.6171+j0.9897	0.8529	32.5430+j21.7297	0.9613	18
01	33-34-35-36-37	1.5059+j0.9255	0.8520	1.4773+j0.9060	0.8525	28.6630+j19.4366	0.9634	18
02	33-34-35-36-37	1.4280+j0.9180	0.8412	1.4000+j0.8990	0.8415	28.0241+j18.9887	0.9654	18
03	33-34-35-36-37	1.3075+j0.8695	0.8327	1.2882+j0.8566	0.8327	19.3517+j12.8119	0.9747	18
04	33-34-35-36-37	1.0486+j0.6928	0.8343	1.0338+j0.6828	0.8344	14.7896+j10.0443	0.9743	18
05	33-34-35-36-37	1.0502+j0.7016	0.8315	1.0351+j0.6914	0.8316	15.1363+j10.2414	0.9733	18
06	33-34-35-36-37	1.0707+j0.7353	0.8243	1.0562+j0.7256	0.8242	14.5355+j9.6915	0.9744	18
07	33-34-35-36-37	0.8354+j0.6029	0.8109	0.8249+j0.5957	0.8107	10.5579+j7.1475	0.9795	18
08	33-34-35-36-37	0.8285+j0.6198	0.8007	0.8196+j0.6139	0.8004	8.8613+j5.8548	0.9807	18
09	33-34-35-36-37	1.3232+j0.8713	0.8352	1.2995+j0.8555	0.8353	23.7048+j15.8390	0.9672	18
10	33-34-35-36-37	1.4659+j0.9582	0.8370	1.4424+j0.9427	0.8371	23.5776+j15.5505	0.9698	18
11	33-34-35-36-37	1.6630+j1.0686	0.8413	1.6291+j1.0461	0.8415	33.9014+j22.5186	0.9619	18
12	33-34-35-36-37	1.4154+j0.8616	0.8542	1.3940+j0.8473	0.8545	21.3849+j14.2569	0.9674	18
13	33-34-35-36-37	1.7255+j1.0686	0.8502	1.6882+j1.0438	0.8506	37.2802+j24.8017	0.9632	18
14	33-34-35-36-37	1.5444+j0.9374	0.8549	1.5168+j0.9193	0.8552	27.6037+j18.1285	0.9650	18
15	33-34-35-36-37	1.6123+j1.0096	0.8475	1.5751+j0.9846	0.8480	37.2410+j24.9216	0.9580	18
16	33-34-35-36-37	1.6716+j1.0781	0.8404	1.6356+j1.0539	0.8406	36.0052+j24.2321	0.9605	18
17	33-34-35-36-37	1.7394+j1.0970	0.8458	1.7078+j1.0759	0.8461	31.5690+j21.0575	0.9634	18
18	33-34-35-36-37	1.6213+j1.0635	0.8362	1.5908+j1.0434	0.8362	30.4644+j20.1238	0.9682	18
19	33-34-35-36-37	2.0866+j1.2335	0.8608	2.0293+j1.1948	0.8617	57.3106+j38.7444	0.9484	18
20	33-34-35-36-37	2.9766+j1.7138	0.8666	2.8778+j1.6480	0.8678	98.8179+j65.7801	0.9376	18
21	33-34-35-36-37	2.4745+j1.4601	0.8612	2.3931+j1.4049	0.8624	81.3949+j55.1986	0.9447	33
22	33-34-35-36-37	2.3571+j1.4633	0.8496	2.2932+j1.4204	0.8501	63.9310+j42.9404	0.9512	33
23	33-34-35-36-37	2.1796+j1.3471	0.8506	2.1196+j1.3069	0.8512	60.0125+j40.2410	0.9478	18

P.F = Power Factor

- ✓ Power factor is assumed 0,90 and 0,71 for household & workspace, respectively.

It is assumed that 80% of the total load is provided by residential buildings and 20% by workplaces.

Table 2. Results after reconfiguration (algorithms are run 100 times)

Time inter.	Run. num	Open Switches Status in Worst Case	Open Switches Status in Best Case (Min. Power Losses)	Source power $\Sigma (P_{gen} + iQ_{gen})$ MW ve MVar	Active and Reactive Load Demand Power MW ve MVar (Best Switches)	Switch Status in Worst Case P_{Losses} (kW)
00	100	7 12 16 28 35	7 9 14 28 36	1.6385+j1.0061	1.6171+j0.9897	23.5749
01	100	7 17 28 34 35	7 9 14 28 36	1.4962+j0.9204	1.4773+j0.9060	21.1783
02	100	7 14 28 32 35	7 9 14 28 36	1.4190+j0.9139	1.4000+j0.8990	21.1300
03	100	7 10 14 26 30	7 9 14 31 37	1.3027+j0.8676	1.2882+j0.8566	16.5761
04	100	7 14 16 28 35	7 9 14 28 36	1.0435 +j0.6902	1.0338+j0.6828	10.5832
05	100	7 12 28 35 36	7 9 14 28 32	1.0455+j0.6995	1.0351+j0.6914	11.6601
06	100	7 14 32 35 37	7 9 14 32 37	1.0665+j0.7334	1.0562+j0.7256	11.2831
07	100	7 8 14 27 32	7 9 14 28 36	0.8315+j0.6008	0.8249+j0.5957	7.0264
08	100	7 11 14 26 32	7 9 14 28 32	0.8257+j0.6186	0.8196+j0.6139	7.0307
09	100	7 14 32 35 37	7 9 14 32 37	1.3155+j0.8671	1.2995+j0.8555	17.3959
10	100	7 11 14 26 32	7 9 14 32 37	1.4594+j0.9552	1.4424+j0.9427	19.4473
11	100	6 11 14 26 36	7 9 14 32 37	1.6526+j1.0637	1.6291+j1.0461	27.7596
12	100	7 9 14 17 26	7 9 14 17 37	1.4090+j0.8582	1.3940+j0.8473	16.1232
13	100	7 9 13 26 32	7 9 14 32 37	1.7142+j1.0631	1.6882+j1.0438	29.2462
14	100	7 14 35 36 37	7 9 14 32 37	1.5359+j0.9333	1.5168+j0.9193	20.8840
15	100	6 9 14 26 32	7 9 14 32 37	1.6003+j1.0038	1.5751+j0.9846	25.3920
16	100	7 11 14 26 32	7 9 14 28 32	1.6600+j1.0723	1.6356+j1.0539	26.1771
17	100	7 12 35 36 37	7 11 28 34 36	1.7316+j1.0940	1.7078+j1.0759	25.4134
18	100	7 11 26 32 34	7 9 14 32 37	1.6134+j1.0600	1.5908+j1.0434	25.0971
19	100	7 13 17 28 35	7 9 14 28 36	2.0677+j1.2245	2.0293+j1.1948	42.3381
20	100	7 14 35 36 37	7 9 14 32 37	2.9476+j1.6996	2.8778+j1.6480	72.0115
21	100	7 14 17 28 35	7 9 14 28 32	2.4470+j1.4457	2.3931+j1.4049	58.3994
22	100	7 11 14 26 32	7 9 14 28 32	2.3395+j1.4548	2.2932+j1.4204	50.5972
23	100	6 9 14 32 37	7 9 14 32 37	2.1600+j1.3370	2.1196+j1.3069	42.0438

Table 3. Results after reconfiguration (algorithms run 100 times- Continuation of Table 2)

Time Inter.	Switches Status in Best Case $\Sigma (P_{loss} + iQ_{loss})$ (Min. Power Losses)	Average Power Losses after algorithms run for 100 times P_{Losses} (kW)	V_{min} (pu) for Bus at i^{th} hour	Bus Num. for V_{min} (pu)	S.D.	Elapsed time (Second)		
						Max	Min	Avg
00	21.3520 +j16.3274	21.8516	0.9766	18	0.4031	7.6852	5.4082	5.6011
01	18.8931+j14.3918	19.4407	0.9775	18	0.4616	9.7015	5.4743	5.9834
02	19.0483+j14.9718	19.5299	0.9768	18	0.4045	7.2428	5.3418	5.5603
03	14.5812+j 10.9514	14.7163	0.9773	32	0.3001	7.7373	5.1830	5.5142
04	9.6267 +j.7.3866	9.90460	0.9846	18	0.2212	9.9486	5.1948	6.0087
05	10.4295 +j 8.1591	10.5887	0.9834	33	0.2118	7.4443	5.0765	5.3209
06	10.3388 +j7.8057	10.4222	0.9820	33	0.1918	8.2146	5.1181	5.3281
07	6.5737+j5.0385	6.6639	0.9873	18	0.0933	7.7871	5.0645	5.2317
08	6.1306+j4.6294	6.1861	0.9867	33	0.1300	10.0539	5.0353	5.2397
09	15.9724+j11.5550	16.1387	0.9795	32	0.2944	8.6275	5.2832	5.4225
10	17.0005+j12.5503	17.1973	0.9786	33	0.3569	8.5344	5.2659	5.4122
11	23.5212+j17.6866	23.8736	0.9748	33	0.6751	7.9660	5.2949	5.3922
12	15.0044+j 10.8782	15.1439	0.9811	18	0.1966	7.2723	5.2025	5.4215
13	26.0149+j 19.3057	26.3740	0.9746	32	0.6384	10.1245	5.3507	5.6314
14	19.0395 +j14.0074	19.1544	0.9786	33	0.2631	10.0152	5.3781	5.6765
15	25.1786+j 19.1737	25.2854	0.9738	32	0.0697	7.4857	5.2737	5.4013
16	24.3465+j18.4817	24.5099	0.9750	33	0.3038	7.6425	5.3541	5.5604
17	23.7749+j 18.0904	24.0334	0.9736	18	0.4051	7.6991	5.4027	5.5604
18	22.5594+j 16.5574	22.7618	0.9769	32	0.4114	7.5880	5.3837	5.5077
19	38.4495+j 29.7104	39.1334	0.9677	18	0.7637	9.1774	5.4699	5.7545
20	69.7703+j 51.5478	69.9169	0.9603	32	0.4361	7.6995	5.5646	5.8670
21	53.9331+j40.7144	54.6395	0.9628	32	0.8800	9.1527	5.5681	5.7851
22	46.3337+j 34.4397	47.1403	0.9651	32	0.8223	7.5756	5.4565	5.6366
23	40.3644+j 30.1640	40.6439	0.9671	33	0.4151	7.4551	5.4465	5.5992

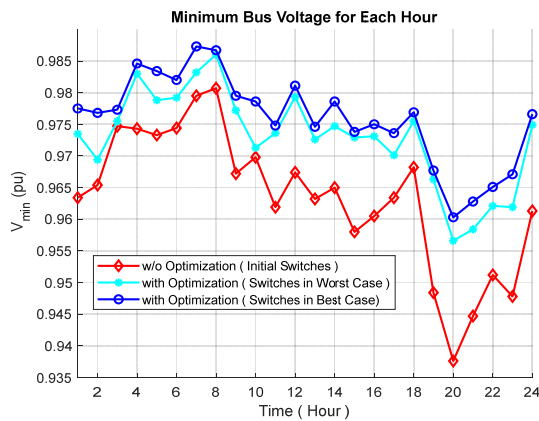


Figure 1. Change of 33 busbar distribution system's minimum voltage value at buses based on hourly basis before and after reconfiguration.

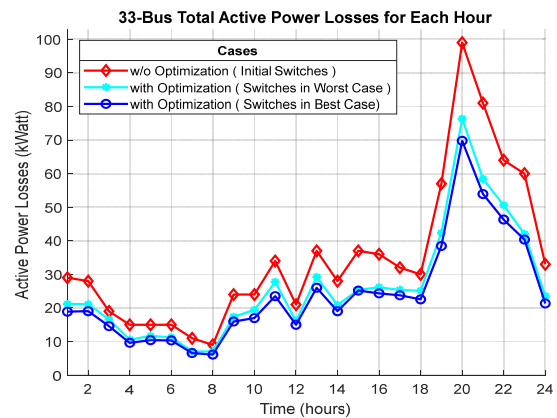


Figure 7. 33-bus system line losses obtained on an hourly basis for the best and worst switching conditions before and after configuration.

The lowest voltage level is calculated as 0.9376 p.u. at the bus 18 at 20:00 before reconfiguration. Different switching configurations are observed to form in the daily reconfiguration process performed on an hourly basis. After reconfiguration, the bus 32 is found to have the lowest voltage level with the value of 0.9603 p.u. daily. Upon examining the line losses at the end of 24 hours, it is observed that the switching configuration of the line remains unchanged. Furthermore, the total active power loss in the line is 836.6615 kWh before reconfiguration and reduces to 578.2372 kWh after reconfiguration. The average reduction in active power loss is determined to be 30.8876%, with the highest improvement rate of 37.73% occurring at 07:00 a.m. The bus voltage levels and active line losses before and after optimization are shown in Figure 6 and Figure 7, respectively.

5. CONCLUSION

In this study, the reconfiguration of the 33-bus electrical distribution system is examined using the SMA. Hourly load profiles belonging to residential and commercial consumers are utilized. Using these load profiles, the numbers of consumers connected to the buses are randomly assigned, and the system was reconfigured on an hourly basis. Hourly analyses reveal that the switching positions vary, resulting in a 30% reduction in grid losses by selecting optimal switching positions. Furthermore, improvements have been achieved in bus voltage levels. The average solution time for the optimization process is approximately 6 seconds.

As a result, choosing appropriate switching positions in the distribution grids using optimization algorithms will enable the grid to transmit energy in a more stable, economical, reliable, and uninterrupted way. The reconfiguration of distribution grids not only according to seasonal loads or peak loads but also hourly basis according to the load change in the grid has been found more effective for reducing losses and increasing voltage stability. This study suggests performing hourly reconfiguration based on optimization in the grid where bus load change is high. Future research can focus on extending the proposed methodology to larger and more complex distribution networks, incorporating real-time data and adaptive optimization techniques to enhance system performance.

6. REFERENCES

1. Cikan, M. & Kekezoglu, B. (2022). Comparison of metaheuristic optimization techniques including Equilibrium optimizer algorithm in power distribution network reconfiguration. *Alexandria Engineering Journal*, 61(2), 991-1031.
2. Radosavljevic, J. (2018). Metaheuristic optimization in power engineering. *The Institution of Engineering and Technology*, 530.
3. Cikan, M. (2025). Çıta optimizasyon algoritması kullanarak kısmi gölgelenme altındaki fotovoltaik sistemlerde maksimum güç noktası izleyicisinin tasarlanması. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 40(1), 555-572.

4. Mishra, S., Das, D. & Paul, S. (2017). A comprehensive review on power distribution network reconfiguration. *Energy Systems*, 8, 227-284.
5. Mishra, A., Tripathy, M. & Ray, P. (2024), A survey on different techniques for distribution network reconfiguration. *Journal of Engineering Research*, 12(1), 173-181.
6. Nacar Cikan, N. & Cikan, M. (2024). Reconfiguration of 123-bus unbalanced power distribution network analysis by considering minimization of current & voltage unbalanced indexes and power loss. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 157, 109796.
7. Cikan, M. & Nacar Cikan, N. (2023). Optimum allocation of multiple type and number of DG units based on IEEE 123-bus unbalanced multi-phase power distribution system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 144, 108564.
8. Wen, J., Tan, Y., Jiang, L. & Lei, K. (2018). Dynamic reconfiguration of distribution networks considering the real-time topology variation. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 12(7), 1509-1517.
9. Baran, M.E. & Wu, F.F. (1989). Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4(3), 1401-1407.
10. Çikan, M. & Nacar Çikan, N. (2024). Elektrikli araç şarj istasyonlarının enerji dağıtım hatlarına optimum şekilde konumlandırılması. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(2), 340-363.
11. Teimourzadeh, H., Mohammadi-Ivatloo, B. & Asadi, S. (2020). Binary group search optimization for distribution network reconfiguration. *Optimization of Power System Problems*, Springer, 103-126.
12. Cikan, M., Nacar Cikan, N. & Kekezoglu, B. (2025). Determination of optimal island regions with simultaneous DG allocation and reconfiguration in power distribution networks. *IET Renewable Power Generation*, 19, e12942.
13. Farhi, E., Goldstone, J. & Gutmann, S. A. (2014). Quantum approximate optimization algorithm. Preprint at <https://arxiv.org/abs/1411.4028>. Access date: 18.10.2024.



IEEE 13-Baralı Dengesiz Üç Fazlı Güç Dağıtım Sistemlerinde Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Optimum Konumlandırılması ve Boyutlandırılması

Murat ÇIKAN^{1,a}

¹Çukurova Üniversitesi, AOSB TBMYO, Elektronik Teknolojisi Bölümü, Adana

^aORCID: 0000-0001-6723-5769

Makale Bilgileri

Geliş : 01.01.2025

Kabul : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665868

Sorumlu Yazar

Murat ÇIKAN

mcikan@cu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Ağırlıklı ortalama arama algoritması

Dengesiz güç dağıtım sistemleri

Dağıtık üretim birimleri

Konumlandırma ve boyutlandırma

Yenilenebilir enerji kaynakları

Atf şekli: ÇIKAN, M., (2025). IEEE 13-Baralı Dengesiz Üç Fazlı Güç Dağıtım Sistemlerinde Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Optimum Konumlandırılması ve Boyutlandırılması. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(1), 89-98.

ÖZ

Dağıtık üretim birimlerinin güç dağıtım ağlarına optimal entegrasyonu, günümüz enerji sistemlerinin karşılaştığı en kritik tasarım problemlerinden biri olup, sistem verimliliği, performansı ve güç kalitesi üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Bu çalışmada, farklı tipte dağıtık güç üretim birimlerinin optimal konumlandırma ve boyutlandırma probleminin çözümü için yeni bir yaklaşım önerilmektedir. Önerilen yaklaşımın test edilmesi için IEEE-13 baralı üç fazlı dengesiz dağıtım hattı üzerinde Fotovoltaik Paneller (PV, Tip-1), Kapasitör Tank (Tip-2) ve Rüzgâr Türbini (WT-Tip-3) olmak üzere üç farklı dağıtık güç üretim birimi kullanılmıştır. Çalışmada, üç farklı senaryo ve her senaryoda üç farklı durum için analizler gerçekleştirilmiş olup, optimizasyon sürecinde güncel Ağırlıklı Ortalama Optimizasyon Algoritması (AOOA) kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, önerilen yöntemin aktif güç kayıplarını %85,75'e kadar azalttığı, gerilim profilini önemli ölçüde iyileştirdiği ve şebekenin güç kalitesini ve performansını kayda değer şekilde artırdığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, önerilen yaklaşımın dağıtık üretim birimlerinin entegrasyonunda etkili bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Optimal Placement and Sizing of Renewable Energy Sources in the IEEE 13-Bus Unbalanced Three-Phase Power Distribution System

Article Info

Received : 01.01.2025

Accepted : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665868

Corresponding Author

Murat ÇIKAN

mcikan@cu.edu.tr

Keywords

Weighted average search algorithm

Unbalanced power distribution systems

Distributed generation units

Placement and sizing

Renewable energy sources

How to cite: ÇIKAN, M., (2025). Optimal Placement and Sizing of Renewable Energy Sources in the IEEE 13-Bus Unbalanced Three-Phase Power Distribution System. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(1), 89-98.

ABSTRACT

The optimal integration of distributed generation units into power distribution networks represents one of the most critical design challenges in contemporary energy systems, directly impacting system efficiency, performance, and power quality. This study presents an innovative approach for solving the optimal placement and sizing problem of different types of distributed power generation units. To test the proposed approach, three distinct distributed power generation units, Photovoltaic Panels (PV, Type-1), Capacitor Bank (Type-2), and Wind Turbine (WT, Type-3), were employed on an IEEE-13 bus three-phase unbalanced distribution line. The study conducted analyses for three different scenarios, each comprising three different cases, utilizing the current Weighted Mean Optimization Algorithm (WMOA) during the optimization process. The analysis results demonstrate that the proposed method reduces active power losses by up to 85.75%, significantly improves the voltage profile, and notably enhances the network's power quality and performance. These findings indicate that the proposed approach offers an effective solution for the integration of distributed generation units.

1. GİRİŞ

Güç dağıtım ağları (GDA), elektrik enerjisinin üreticiden tüketiciye iletilmesini sağlayan kritik altyapılardır. Son yıllarda artan yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, değişken güç üretim özellikleri ve yük taleplerindeki dalgalanmalar, GDA'lar için önemli zorluklar yaratmaktadır. Özellikle, elektrikli araçların yaygınlaşması ve enerji talebinin artması, bu ağlar üzerinde ek bir baskı oluşturmaktadır, mevcut altyapının verimli çalışmasını zorlaştırmaktadır [1]. Geleneksel olarak, GDA'ların çalışması dengeli üç fazlı olarak tasarlanmışken, pratikte ise çoğunlukla dengesiz karakteristikler sergileyerek daha karmaşık hale gelmektedir [2]. Bu dengesizlik, tek fazlı yükler, asimetrik hat yapıları ve düzensiz yük dağılımları gibi faktörlerle daha da belirginleşmektedir.

Literatürde, dengeli GDA'larda dağıtık üretim (DÜ) birimlerinin yerleştirilmesi üzerine birçok çalışma yapılmış olup, bu çalışmalar [3,4] makalelerinde özetlenmiştir. Ancak, dengesiz GDA'lar üzerinde yapılan araştırmalar, bu ağların pratikte karşılaşılan zorluklarını göz önünde bulundurarak daha fazla önem kazanmaktadır. Dengesiz GDA'larda, DÜ yerleştirilmesi ve optimizasyonu oldukça karmaşık bir problem haline gelmektedir ve bu alandaki çalışmalar [5] makalesinde detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) değişkenliği, fazlar arası dengesizlikler ve düzensiz yük dağılımları, geleneksel optimizasyon yöntemlerinin etkinliğini sınırlamaktadır. Bu nedenle, meta-sezgisel algoritmalar son yıllarda bu tür zorlukların üstesinden gelmek için giderek daha fazla kullanılmaktadır [6-9]. DÜ'lerin GDA'lara optimal şekilde yerleştirilmesi için son yıllarda yapılan bazı çalışmalar şu şekildedir. Balu ve Mukherjee [10] IEEE 33-baralı ve Brezilya 136-baralı test sistemlerinde, elektrikli araç şarj ve pil değiştirme istasyonlarının şebeke üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Optimum yerleşim ve boyutlandırma işlemleri, yenilenebilir enerji kaynakları (fotovoltaik, rüzgâr türbini) ve enerji depolama sistemleriyle birlikte ele alınarak, kaotik öğrenci psikolojisi temelli optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Gümüş ve arkadaşları IEEE-69 ve IEEE-118 baralı test sistemlerinde, DÜ birimlerinin optimal yerleşimi ve boyutlandırılmasını, güç kayıplarını azaltmak, gerilim profilini iyileştirmek ve sistem kararlılığını artırmak amacıyla incelemiştir [11]. Problem, çok amaçlı bir yaklaşım çerçevesinde karışık tam sayılı Genetik Algoritma ve Gri Kurt Optimizasyonu ile çözülmüş, DÜ'lerin farklı güç faktörlerindeki reaktif gücü de dikkate alınmıştır. Cikan ve Nacar Cikan üç fazlı 123-baralı dengesiz güç dağıtım ağı üzerinde, üç farklı türdeki DÜ birimlerinin konum, boyut, bağlantı tipi (Δ/Y), ve güç faktörünün optimizasyonu için denge optimizasyon (Equilibrium Optimizer) algoritmasını kullanmıştır [5]. Çalışma, MATLAB ortamında yazılan ve uygulanan bir dengesiz üç fazlı ileri geri yük akış algoritmasıyla gerçekleştirilmiş ve denge optimizasyon algoritmasının üstünlüğü, güç kaybı, gerilim profili iyileştirmesi ve algoritmanın hız ve güvenilirlik gibi performans kriterleri açısından diğer altı optimizasyon algoritmasıyla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Kandasamy ve arkadaşları [12] optimal DÜ ve DSTATCOM yerleşimi için geliştirilmiş genişletilmiş yapay arı kolonisi (Enhanced Artificial Bee Colony) algoritmasını kullanmıştır. Çalışma, IEEE 13-bara dengesiz ve 33-bara dengeli radyal güç dağıtım ağı test sistemlerinde simülasyonlarla gerçekleştirilmiştir. Pushkarna ve arkadaşları rüzgâr santrallerindeki Tip IV jeneratörlerinin optimal yerleşimi ve boyutlandırılmasını, dengesiz güç dağıtım sistemlerinde reaktif destekle entegrasyonunu ele almıştır [13]. Optimizasyon için partikül sürü optimizasyonu algoritması kullanılmıştır ve sistemdeki güç kaybının minimize edilmesi hedeflenmiştir. Çalışma, IEEE 34 ve 123 düğüm dengesiz test sistemlerinde gerçekleştirilmiştir.

Bu makalede, fotovoltaik (PV), rüzgâr türbini (RT) ve kapasitör tankı (KT) gibi dağıtık üretim birimlerinin güç dağıtım ağlarına entegrasyonu ele alınmıştır. Çalışma kapsamında, IEEE 13-baralı dengesiz dağıtım hattında güç kayıplarını azaltmak ve gerilim profilini iyileştirmek amacıyla bu birimlerin en uygun yerleşimi ve boyutlandırılması üzerine çalışılmıştır. Analizler, DÜ biriminin entegrasyonunu içeren üç farklı senaryo her bir senaryoda ise üç farklı durumu içerecek şekilde gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon sürecinde, Ağırlıklı Ortalama Optimizasyon Algoritması (AOOA) kullanılmıştır. Sonuçlar, önerilen yöntemin aktif güç kayıplarını %85,75 oranında azaltarak ve gerilim profilini iyileştirerek şebeke performansını artırmada etkili olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmanın literatüre özgün katkıları ise şu şekilde özetlenebilir:

- Dengesiz üç fazlı dağıtım sistemlerinde farklı yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) eş zamanlı optimizasyonu için kapsamlı bir metodoloji sunulmuştur.
- Rüzgâr türbinlerinin güç faktörünün optimizasyon parametresi olarak modele dahil edilmesi, bu tür kaynakların etkili entegrasyonu için önemli bir yenilik sunmaktadır.
- IEEE 13-baralı test sisteminde, dengesiz yapıların etkilerini daha ayrıntılı bir şekilde analiz edilmiştir.
- Sistem kayıplarının minimize edilmesi için çok parametrelili bir optimizasyon yaklaşımı geliştirilmiştir.

Bu katkılar, dengesiz GDA'larda YEK entegrasyonunun ve optimizasyonunun daha etkin bir şekilde yapılmasına olanak tanımaktadır.

Makalenin geri kalanı şu şekilde organize edilmiştir: Bölüm 2'de problem formülasyonu ve matematiksel modelleme detaylandırılmakta, sistem bileşenlerinin modellenmesi ve kısıtlar sunulmaktadır. Bölüm 3'te önerilen optimizasyon metodolojisi ve çözüm algoritması açıklanmaktadır. Bölüm 4, simülasyon sonuçlarını ve karşılaştırmalı analizleri içermektedir. Farklı senaryo analizleri ve performans değerlendirmeleri bu bölümde sunularak tartışılmıştır. Son olarak, Bölüm 5'te çalışmanın sonuçları özetlenmektedir.

2. OPTİMİZASYON PROBLEMİNE AİT FORMÜLLER

Bu bölümde, güç dağıtım sistemlerinin optimizasyon problemini tanımlayan matematiksel modelleme ve temel kısıtlamalar açıklanmıştır. Amaç, dağıtım ağının verimliliğini, güvenilirliğini ve genel performansını artırmaktır.

2.1. Kısıtlamalar

Eşitlik 1'de, her bir baradaki (her faz için) gerilim değerlerinin, sistemin güvenilir ve kararlı çalışmasını sağlamak amacıyla tanımlanmış minimum ve maksimum sınırlar arasında olması gerektiğini göstermektedir. Gerilim sınırları, dağıtım sistemindeki gerilim kararlılığını ve ekipman güvenliğini garanti eder.

$$V_{\min}^{A,B,C} \leq V_i^{A,B,C} \leq V_{\max}^{A,B,C} \quad \forall i \in n_{\text{branch}} \quad (1)$$

Eşitlik 2'de, iletim hatlarındaki (her faz için) akım büyüklüklerinin, izin verilen maksimum akım değerini aşmaması gerektiğini belirtmektedir. Bu kısıtlama, ekipmanların güvenli bir şekilde çalışmasını ve sistemdeki aşırı yüklenmelerin önlenmesini sağlamaktadır.

$$I_{ij}^{A,B,C} \leq I_{ij,\max}^{A,B,C} \quad \forall (i,j) \in n_{\text{branch}} \quad (2)$$

Eşitlik 3, güç dengesini tanımlamaktadır. Sistemdeki toplam aktif güç üretiminin, toplam yük talebi ve iletim hatlarındaki güç kayıplarının toplamına eşit olması gerektiğini göstermektedir. Böylece, sistem dengeli bir şekilde çalışır ve enerji arz-talep dengesi sağlanır.

$$\sum_{i \in N} P_i = \sum_{j \in N} (P_j + P_{L,j}) \quad (3)$$

Eşitlik 4'te, transformatörlerin primer ve sekonder taraflarındaki gerilim ve akım değerlerinin, belirlenmiş minimum ve maksimum sınırlar arasında kalması gerektiği belirtilmektedir. Transformatörlerin uygun sınırlar içinde çalışması, aşırı yüklenmeyi önler ve ekipman ömrünü uzatır.

$$\begin{aligned} V_{\min}^{A,B,C} &\leq V_{i,\text{pri}}^{A,B,C}, V_{i,\text{sec}}^{A,B,C} \leq V_{\max}^{A,B,C} \\ I_{i,\text{prim}}^{A,B,C} &\leq I_{i,\text{prim,max}}^{A,B,C} \\ I_{i,\text{sec}}^{A,B,C} &\leq I_{i,\text{sec,max}}^{A,B,C} \end{aligned} \quad (4)$$

Eşitlik 5’te, gerilim regülatörünün kademe ayarına bağlı olarak gerilim değerinin her faz için, minimum ve maksimum sınırlar arasında olması gerektiğini tanımlamaktadır. Bu kısıtlama ile gerilim değerinin izin verilen sınırlar içerisinde artırılıp/ azaltılmasına izin verilir.

$$VR_{\min}^{A,B,C} \leq VR_i^{A,B,C} \leq VR_{\max}^{A,B,C} \quad (5)$$

2.2. Amaç Fonksiyonu

Çalışmanın amaç fonksiyonu, dağıtım hattındaki toplam aktif güç kayıplarını minimize etmeye yöneliktir. Eşitlik 6’da $P_{\text{loss}}^{\text{line}}$ hat boyunca meydana gelen toplam aktif güç kayıplarını ifade etmektedir ve bu kayıplar, her fazdaki akım karesinin (I_{ij}^2) hat direnci (R_{ij}) ile çarpılması ve tüm hatlar üzerinden toplanması ile hesaplanmaktadır. Bu amaç, 13-baralı bir dengesiz güç dağıtım hattında dağıtık ünitelerin optimal yerleşim ve büyüklüklerinin belirlenmesiyle gerçekleştirilmiştir.

$$P_{\text{loss}}^{\text{line}} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^3 R_{ij} (I_{ij}^2) \quad (6)$$

3. YÖNTEM VE SİSTEM MODELİ

Bu bölümde, dengesiz üç fazlı güç dağıtım sistemlerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının optimum konumlandırılması ve boyutlandırılması için kullanılan metodoloji ve sistem modeli detaylandırılmıştır. Öncelikle, optimizasyon sürecinde kullanılan Ağırlıklı Ortalama Optimizasyon Algoritmasının çalışma prensibi ve matematiksel formülasyonu açıklanmıştır. Ardından, çalışmada test platformu olarak kullanılan IEEE-13 baralı dengesiz dağıtım sisteminin teknik özellikleri ve karakteristikleri sunulmuştur. Son olarak, geliştirilen yük akış algoritmasının doğruluğunu ve performansını değerlendirmek amacıyla yapılan karşılaştırmalı analizler ve doğrulama sonuçları ortaya konulmuştur. Bu bölümdeki bilgiler, çalışmanın tekrarlanabilirliğini sağlamak ve uygulanan yöntemlerin etkinliğini göstermek açısından önem taşımaktadır.

3.1. Ağırlıklı Ortalama Optimizasyon Algoritması (AOOA)

AOOA, popülasyondaki her bireyin konumunu iteratif bir süreçle iyileştirerek global optimuma ulaşmayı hedefleyen yeni nesil bir arama algoritmasıdır [14]. Algoritmanın temelini oluşturan yenilikçi yaklaşım, keşif (exploration) ve derinlemesine arama (exploitation) süreçleri arasında etkili bir denge kurulmasını sağlamaktır. Bu süreçte ağırlıklı ortalama pozisyon, popülasyonun genel dağılımını temsil eden bir ölçüt olarak kullanılır ve algoritmanın daha hızlı ve daha doğru sonuçlara ulaşmasını mümkün kılar. AOOA’nın temel aldığı ağırlıklı ortalama pozisyon yaklaşımı, optimizasyon sürecinde bireylerin fitness değerlerini dikkate alarak, nüfusun genel özelliklerini yansıtan bir pozisyon belirler. Bu yöntem, her iterasyonda hesaplanan ağırlıklı ortalama pozisyonun, bireylerin kişisel en iyi pozisyonları (personal best) ve popülasyondaki global en iyi pozisyon (global best) ile birleştirilmesiyle uygulanır. Böylece, algoritma hem çözüm uzayını daha etkin bir şekilde keşfeder hem de en iyi çözüme doğru hızlı bir şekilde yakınsar. Ağırlıklı ortalama pozisyon, bireylerin fitness değerlerine bağlı olarak hesaplanır. Bu hesaplama, "Smaller-The-Better" (STB) ve "Larger-The-Better" (LTB) kriterlerine göre farklı şekilde gerçekleştirilir. STB durumunda ağırlıklı ortalama pozisyon Eşitlik 7’deki formülle hesaplanır.

$$X_{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{aday}}} X_i (\text{Fit}_{\text{tot}} - \text{Fit}(X_i))}{\text{Fit}_{\text{tot}} (N_{\text{aday}} - 1)} \quad (7)$$

X_{μ} , ağırlıklı ortalama pozisyonu; X_i , aday çözüm; $\text{Fit}(X_i)$, bireyin fitness değeri ve Fit_{tot} ; seçilen adayların fitness toplamını temsil eder. AOOA her iterasyonda, keşif (exploration) veya derinlemesine arama (exploitation) stratejilerinden birini uygular. Bu seçim, Eşitlik 8'deki parametre fonksiyonuna dayalıdır:

$$f(i_{\text{ter}}) = (\alpha \cdot \text{rast} - 1) \cdot \sin\left(i_{\text{ter}} \cdot \frac{\pi}{\max i_{\text{ter}}}\right) \quad (8)$$

Burada i_{ter} , mevcut iterasyon numarasını; $\max i_{\text{ter}}$, maksimum iterasyon sayısını; α , dengenin kontrolü için kullanılan bir sabiti ve rast, rastgele bir değeri ifade eder. Eğer $f(i_{\text{ter}}) \geq 0.5$ ise, sömürü; aksi durumda ise keşif stratejisi uygulanır.

Optimum konumlandırma ve boyutlandırma probleminin çözümünde, AOO algoritmasının maksimum iterasyon sayısı 100, popülasyon büyüklüğü ise 25 olarak seçilmiştir. Optimizasyon sonuçlarının güvenilirliğini ve tutarlılığını sağlamak amacıyla, her bir durum/senaryo için algoritma 100 kez bağımsız olarak çalıştırılmış ve elde edilen sonuçların ortalaması alınmıştır. Keşif ve sömürü süreçleri arasındaki dengeyi sağlamak üzere, α parametresi 10 olarak belirlenmiştir [14]. Söz konusu parametreler, literatürdeki benzer çalışmaların bulguları ve gerçekleştirilen ön analizler doğrultusunda, problem için en uygun performansı sağlayacak şekilde optimize edilmiştir.

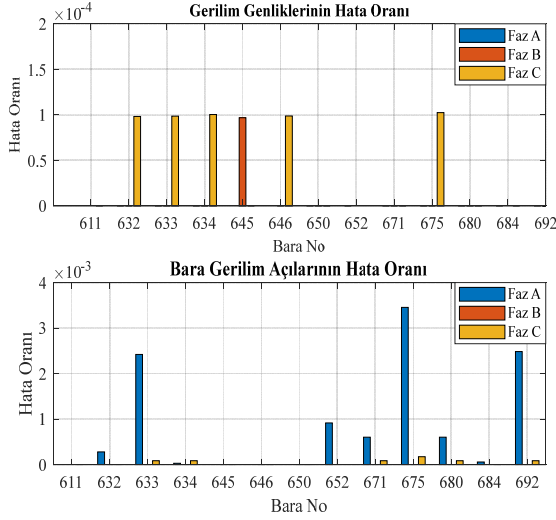
3.2. IEEE-13 Baralı Test Sisteminin Teknik Detayları

IEEE 13-baralı test sistemi, elektrik dağıtım şebekelerinin analizinde yaygın kullanıma sahip kompakt bir referans modelini teşkil etmektedir. Sistem, 4.16 kV nominal gerilim seviyesinde işletilmekte olup, kısa mesafeli iletim hatları ve yüksek yük yoğunluğu ile karakterize edilmektedir. Bu özellikler, sistemin bilhassa küçük ölçekli dağıtım şebekelerinin incelenmesinde optimal bir araştırma platformu olarak kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Sistemin temel yapısal bileşenleri arasında, dengeli ve dengesiz karakteristiklere sahip noktasal yükler ile hat boyunca dağıtılmış yükler bulunmaktadır [15]. Dengesiz güç dağıtım sisteminde, yükler tek fazlı, iki fazlı, yıldız (Y) ya da delta (Δ) konfigürasyonlarında bağlanmıştır. Sistemde, sabit güç (PQ), sabit empedans (Z) ve sabit akım (I) olmak üzere üç farklı yük karakteristiği mevcuttur. Bu çeşitlilik, sistem performansının farklı yük senaryoları altında kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine imkân tanımaktadır. IEEE-13 baralı test sisteminde reaktif güç kompanzasyonu, üç fazlı dengeli ve tek fazlı şönt kapasitör bankları vasıtasıyla sağlanmaktadır. Bu konfigürasyon, gerilim profilinin optimizasyonuna ve sistem kayıplarının minimizasyonuna katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, üç fazlı yıldız bağlı bir gerilim regülatörü, her bir fazın gerilim seviyesini sürekli olarak monitörize ederek belirlenen limitler dahilinde kalmasını temin etmekte ve böylece sistem güvenilirliğini artırmaktadır. Hat konfigürasyonları açısından sistem hem üç fazlı hem de tek fazlı iletim hatlarını ihtiva etmektedir. Bu heterojen yapı, faz-faz ve faz-toprak bağlantılarının çeşitli kombinasyonlarının analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Hatların farklı karakteristikleri, gerilim düşümü ve akım dengesizliklerinin detaylı incelenmesi bakımından sistemin analitik esnekliğini artırmaktadır. Sonuç olarak, IEEE 13-baralı test sistemi, dağıtım şebekelerinin temel parametrelerinin analizi için çok yönlü bir araştırma platformu sunmaktadır. Sistemin kompakt yapısı ve yüksek yük yoğunluğu, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ve optimizasyonu çalışmalarında değerli bir referans model olarak kullanılmasını mümkün kılmaktadır.

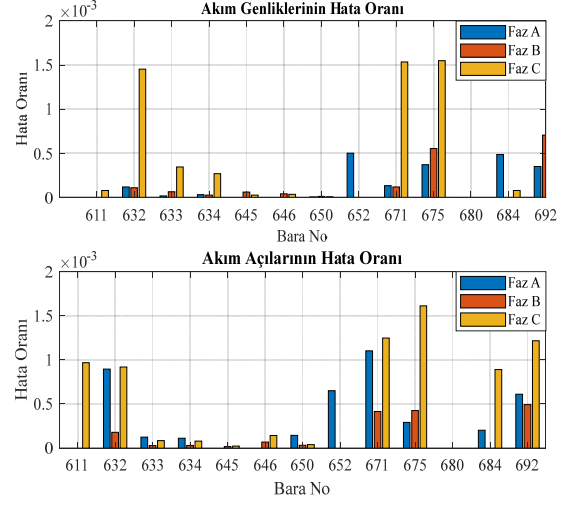
3.3. IEEE-13 Baralı Test Sisteminin Yük Akış Algoritmasının Sonuçlarının Karşılaştırılması

IEEE 13-baralı test sistemi kullanılarak gerçekleştirilen yük akış analizine ait gerilim, gerilim açısı, akım ve akım açılarındaki hata oranları Şekil 1 ve Şekil 2'de gösterilmiştir. Sonuçlar, her bara için Faz A, Faz B ve Faz C için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Şekil 1'de yazılan Matlab script kod ile IEEE-13 baralı test sisteminin gerilimin genlik değerinin ve gerilimlerin açısına ait sonuçları karşılaştırılmıştır. Görüleceği üzere en kötü durumda genlik değerinin hata miktarı 1×10^{-4} seviyesindedir. Aynı şekilde 675.baraya ait gerilim açısının hata oranı ise A-fazında 3.5×10^{-3} seviyesinde hesaplanmıştır. Elde edilen hata sonuçları birçok ticari yazılımın üretmiş olduğu sonuçlardan daha küçüktür. Şekil 2'de akım genlikleri ve akım

açılarındaki hata oranları analiz edilmiştir. Baralara ait akım genliklerinin ve açılarının hata oranları C-fazında sırasıyla en yüksek 2×10^{-3} ve 1.5×10^{-3} mertebesinde hesaplanmıştır. İleri-geri süpürme metodu (BFLF) ile yazılan yük akış algoritmasının karşılaştırmalı analiz sonuçları, yazılan Matlab script kodun dengersiz dağıtım sistemleri üzerindeki doğruluk performansını değerlendirmekte etkili olduğunu göstermektedir. Sonuçlar, sistem fazlarının ayrı ayrı ele alınmasının ve optimizasyon algoritmalarının bu dengersizliklere göre uyarlanmasının önemini vurgulamaktadır.



Şekil 1 BFLF yük akışında elde edilen bara gerilim ve açısına ait değerlerin IEEE-13 baralı test sistemi ile karşılaştırılması



Şekil 2 BFLF yük akışında elde edilen bara akım ve açısına ait değerlerin IEEE-13 baralı test sistemi ile karşılaştırılması

4. BENZETİM SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu çalışma, IEEE 13-baralı dengersiz güç dağıtım sisteminde uygulanan üç farklı türdeki DÜ entegrasyon stratejisinin kapsamlı bir analizini sunmaktadır. Araştırma, Tip-I (PV), Tip-II (kapasitör) ve Tip-III (rüzgâr türbini) DÜ ünitelerini kapsamaktadır. Çizelge 1, 2 ve 3'te sunulan sonuçlar DÜ ilavesi sonrasında, güç dağıtım sisteminde oluşan aktif/reaktif güç kayıplarını ve gerilim profillerindeki değişimleri göstermektedir. Tablo 1, IEEE 13-baralı test sistemine fotovoltaik (PV) sistemlerin entegre edilmesi sonrasında, durum 1,2 ve 3 altında elde edilen güç enjeksiyonlarının sonuçlarını göstermektedir. Bu analiz, PV sistemlerin farklı baralarda konumlandırılması ve boyutlandırılması ile dağıtım sistemindeki güç kayıplarına, gerilim profiline ve faz dengesine olan etkisini göstermektedir. İlk durumda, 671 numaralı baraya bir adet PV sistemi Δ -bağlı şekilde yerleştirilmiştir. Bu bağlantı, her faza eşit büyüklükte aktif güç enjekte edilmesini sağlamak ve faz dengesini korumaktadır. Yalnızca aktif güç sağlandığı için güç faktörü 1 olarak belirlenmiştir. 671 nolu baradan 3068.47 kW aktif güç, dağıtım hattına enjekte edilmiş ve hatlarda $34.76 \text{ kW} + j75.40 \text{ kVAr}$ güç kaybı oluşmuştur. Yapılan konumlandırma ve boyutlandırma optimizasyonu ile sistemin maksimum gerilim değeri 675. barada 1.0677 pu seviyesine ulaşmıştır. İkinci durumda, PV'ler 634 ve 671 numaralı baralarda konumlandırılmıştır. 634 ve 671. baralardan sırasıyla 443.30 kW ve 2847.72 kW aktif güç sisteme gönderilmiştir. Bu durumda hat kayıpları $29.51 \text{ kW} + j64.26 \text{ kVAr}$ olarak hesaplanmıştır. Bu konumlandırmada da maksimum gerilim değeri 675. numaralı barada 1.0677 pu olarak ölçülmüş, gerilim profili ve faz dengesi iyileştirilmiştir. Durum-3'te ise 634, 671 ve 675 baralarına üç adet PV ünitesi yerleştirilmiştir. Bu durumda, 634 barasında 443.28 kW, 671 barasında 1962.56 kW ve 675 barasında 880.66 kW aktif güç sisteme basılmıştır. Elde edilen maksimum gerilim değeri 1.0699 pu olarak kaydedilmiş olup, bu senaryo gerilim stabilitesi açısından en yüksek iyileşmeyi sağlamıştır. Bu sonuçlar ile, PV'lerin optimum konumlandırılması ve boyutlandırılması ile dağıtım sistemlerindeki aktif güç kayıplarını azaltabileceğini, gerilim profilini iyileştirebileceğini ve sistemde faz dengesini koruyabileceğini göstermektedir.

Çizelge 1. Tip-I DÜ'ler (Senaryo I) tarafından enjekte edilen dengeli güç sonuçları

Senaryo I	Durum no	Konum (Bara no)	Güç faktörü $\cos(\Phi)$	DÜ boyutu (kW)	Bağlantı tipi	P_{Loss}^{Active} (kW) $Q_{Loss}^{Reactive}$ (kVAr)	$V_{Maksimum}$ (p.u) Bara numarası
İlk durum	-----	-----	-----	-----	-----	110.103 j324.653	1.0553 \angle - 122.52 Bara 675 (B)
1-PV	Case 1	671 (A)	1	3068.4681	Δ	34.75911 j75.40031	1.0677 \angle - 118.19 Bara 675 (B)
		671 (B)					
		671 (C)					
2-PV	Case 2	634 (A)	1	443.3025	Δ	29.51075 j64.25942	1.0677 \angle - 118.19 Bara 675 (B)
		634 (B)					
		634 (C)					
		671 (A)					
		671 (B)					
3-PV	Case 3	671 (B)	1	1962.56475	Δ	27.54431 j62.27445	1.0699 \angle - 118.11 Bara 675 (B)
		671 (C)					
		675 (A)					
		675 (B)					
		675 (C)					
		634 (A)					
		634 (B)					

Çizelge 2, IEEE 13-baralı dağıtım sistemine kapasitör tankı (KT) eklenmesi sonrasında elde edilen sonuçları göstermektedir. Çalışmada, sistemin farklı baralarına eklenen kapasitörlerin, dağıtım hatlarındaki aktif ve reaktif güç kayıplarını azalttığı ve gerilim profilinin iyileştirilmesinde yardımcı olduğunu göstermektedir. İlk durumda, 671 numaralı baraya kapasitör tankı yerleştirilmiştir. Bu konfigürasyonda, 671 barasında 1261.27 kVAr reaktif güç enjekte edilmiştir. Hat kayıpları başlangıç durumunda 110.1 kW+j324.653 kVAr ölçülmüştür. Kapasitör tank ilavesi sonucunda hat kayıpları 96.70 kW + j284.85 kVAr seviyesine düşmüştür. Sisteme kapasitör ilavesi sonrası maksimum gerilim değeri 1.0675 pu seviyesine ulaşmıştır. Bu senaryo, tek konumda gerçekleştirilen kapasitör ilavesinin gerilim profilinde belirgin bir iyileşme sağladığını göstermektedir. İkinci durumda, 634 ve 671 numaralı baralara kapasitörler eklenmiştir. Baralarda sırasıyla 339.61 ve 1086.81 kVAr reaktif güç dağıtım sistemine basılmıştır. Bu durumda hat kayıpları aktif ve reaktif güçler için 93.61 kW + j277.76 kVAr seviyesine kadar inmiştir. Bu yerleşim ile sistemdeki maksimum gerilim değeri 1.0886 pu olarak kaydedilmiştir. İki farklı baraya kapasitör eklenmesi ile daha geniş bir voltaj desteği sağlanmış ve kayıplar optimize edilmiştir. Durum-3'te, 632, 634 ve 671 numaralı baralara kapasitörler yerleştirilmiştir. Bu durumda, 632 barasına 567.65 kVAr, 634 barasına 297.96 kVAr ve 671 barasına 827.77 kVAr reaktif güç sisteme enjekte edilmiştir. Hat kayıpları 93.04 kW + j275.64 kVAr olarak hesaplanmıştır. Maksimum gerilim değeri 1.0888 pu olarak 675. barada kaydedilmiştir. Üç baraya yapılan kapasitör ilavesi, gerilim dengesini sağlamak ve kayıpları minimize etmede en yüksek verimi sağlamıştır. Elde edilen sonuçlar, kapasitörlerin uygun konumlandırılması ile dağıtım sistemlerinde reaktif güç desteği sağlayarak gerilim profilini iyileştirdiğini ve güç kayıplarını azalttığını göstermektedir. Kapasitör ilavesi, dağıtım sisteminin daha verimli ve güvenilir bir şekilde çalışmasını desteklemektedir.

Çizelge 2. Tip-II DÜ'ler (Senaryo II) tarafından enjekte edilen dengeli güç sonuçları

Senaryo II	Durum no	Konum (Bara no)	DÜ boyutu (kVAr)	Bağlantı tipi	P_{Loss}^{Active} (kW) $Q_{Loss}^{Reactive}$ (kVAr)	$V_{Maksimum}$ (p.u) Bara numarası
İlk durum	-----	-----	-----	-----	110.103 j324.653	1.0553 \angle - 122.52 Bara 675 (B)
1-KT	Case 1	671 (A) 671 (B) 671 (C)	1261.27405	Δ	96.69876 j284.85384	1.0675 \angle - 118.19 Bara 675 (B)
2-KT	Case 2	634 (A) 634 (B) 634 (C) 671 (A) 671 (B) 671 (C)	339.60720 1086.80732	Δ Δ	93.61243 j277.76005	1.0886 \angle - 122.79 Bara 675 (B)
3-KT	Case 3	632 (A) 632 (B) 632 (C) 634 (A) 634 (B) 634 (C) 671 (A) 671 (B) 671 (C)	567.6460236 297.95810 827.77002	Δ Δ Δ	93.04421 j275.63566	1.0888 \angle - 122.78 Bara 675 (B)

Çizelge 3, 13-baralı test sistemine rüzgâr türbini eklenmesi ile elde edilen güç aktarımlarının çeşitli senaryolar altındaki etkilerini göstermektedir. Bu çalışma, sistemde farklı baralara eklenen rüzgâr türbinlerinin aktif ve reaktif güç enjeksiyonu ile güç kayıplarını ve gerilim profillerini nasıl etkilediğini analiz etmektedir. Durum-1'de, 671 numaralı baraya bir adet rüzgâr türbini bağlanmıştır. Güç faktörü (GF) 0.942 olarak belirlenmiş olup, türbin 3275.01 kVA güç üretmektedir. Bu durumda güç dağıtım hattında 25.11 kW aktif güç ve j.49.57 kVAr reaktif güç kaybı meydana gelmektedir. Maksimum gerilim değeri birinci ve ikinci senaryoya benzer şekilde 675.barada olduğu görülmektedir. Rüzgâr türbinin güç dağıtım sistemine ilavesi sonrasında, sistemin gerilim seviyesini sınırlar içerisinde kalacak şekilde yükseltmiştir. İkinci durumda, rüzgâr türbinleri 634 ve 671 numaralı baralara yerleştirilmiştir. 634 barasına bağlanan türbinin güç faktörü 0.8126 olup 543.43 kVA güç üretmektedir. 671 barasına bağlanan türbin ise anlık olarak 3001.57 kVA güç üretmekte olup, güç faktörü 0.952 olarak hesaplanmıştır. Konumlandırma ve boyutlandırma sonrasında dağıtım hatlarındaki aktif ve reaktif kayıp güç değeri sırasıyla 17.60 kW ve j33.53 kVAr olarak hesaplanmıştır. Bu yerleşim ile maksimum gerilim değeri 1.0956 pu olarak kaydedilmiştir. İki bara üzerinde rüzgâr türbinlerinin bulunması, dağıtık güç enjeksiyonuyla sistemde daha geniş bir gerilim desteği sağlamaktadır. Üçüncü durumda, 634, 671 ve 675 numaralı baralara üç adet rüzgâr türbini yerleştirilmiştir. 634 barasında güç faktörü 0.81266 olan türbin 543.42 kVA anlık güç üretmekte, 671.barada yer alan WT ise 2183.56 kVA ve GF değeri ise 0.90827 olarak şekilde anlık güç üretimi yapmaktadır. 675 barasına yerleştirilen üçüncü türbin ise tam güç faktörü (GF = 1.0) ile çalışarak 868.31 kVA güç sağlamaktadır. Yerleşim tahsisi sonucunda dağıtım hatlarında meydana gelen aktif/reaktif güç kaybı 15.82 kW ve j.31.85 kVAr olarak hesaplanmıştır. Maksimum gerilim değeri 1.0975 pu'dur. Optimum rüzgâr türbini yerleşimi, sistemde düşük güç kaybı, iyileştirilmiş gerilim ve güç kalitesi sağlayarak dağıtım sisteminin performansını artırmaktadır.

Çizelge 3 Tip-III DÜ'ler (Senaryo III) tarafından enjekte edilen dengeli güç sonuçları

Senaryo III	Durum no	Konum (Bara no)	Güç faktörü $\cos(\Phi)$	DÜ boyutu (kVA)	Bağlantı tipi	P_{Loss}^{Active} (kW) $Q_{Loss}^{Reactive}$ (kVAr)	$V^{Maksimum}$ (p.u) Bara numarası
İlk durum	-----	-----	-----	-----	-----	110.103 j324.653	1.0553 \angle - 122.52 Bara 675 (B)
1-RT	Case 1	671 (A) 671 (B) 671 (C)	0.94176	3275.01127	Δ	25.11005 j49.56718	1.0959 \angle -118.53 Bara 675 (B)
2-RT	Case 2	634 (A) 634 (B) 634 (C) 671 (A) 671 (B) 671 (C)	0.81266 0.95146	543.42944 3001.57305	Δ Δ	17.60208 j33.53017	1.0956 \angle -118.53 Bara 675 (B)
3-RT	Case 3	634 (A) 634 (B) 634 (C) 671 (A) 671 (B) 671 (C) 675 (A) 675 (B) 675 (C)	0.90827 1.0000	2183.56326 868.31394	Δ Δ	15.81642 j31.84643	1.0975 \angle -118.44 Bara 675 (B)

5. SONUÇ

Bu çalışmada, Tip-I, Tip-II ve Tip-III DÜ ünitelerinin, dengesiz üç fazlı güç dağıtım hattına entegre edilmesi sonucunda, hattın aktif /reaktif güç kayıplarının ve bara gerilim profilleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. PV sistemlerinin farklı baralarda konumlandırılması ve boyutlandırılması, gerilim profili üzerinde belirgin bir iyileşme sağlamış, ayrıca aktif güç kayıplarını azaltmış ve sistemin faz dengesini optimize etmiştir. Yapılan analizlerde, PV ünitelerinin uygun baralara konumlandırılması ile gerilim seviyesinin iyileştirildiği ve çoklu PV ünite konfigürasyonlarıyla daha dengeli bir güç dağılımı sağlandığı görülmüştür. Özellikle 634, 671 ve 675 baralarına üç adet PV yerleştirildiği durumda, sistemin gerilim seviyesi 1.0699 pu olarak kaydedilmiştir. Senaryo-II'de kapasitör ünitelerinin dağıtım sistemine eklenmesi sonucunda, reaktif güç desteği sağlanmış ve gerilim profili iyileştirilerek hat kayıpları belirli seviyelere kadar düşürülmüştür. Kapasitörlerin uygun baralara tahsisi ile gerilim seviyesi ve sistem verimliliğinin artmasına katkı sağlamış; özellikle üç farklı baraya yapılan kapasitör ilaveleri, sistemde maksimum gerilim değerini 1.0888 pu seviyesine ulaştırmış ve aktif güç kayıp değeri 93.04 kW olarak hesaplanmıştır. Rüzgâr türbinlerinin entegrasyonu ile elde edilen analizlerde, türbinlerin farklı baralarda konumlandırılması, sistemdeki aktif ve reaktif güç kayıplarını %85,75 seviyede azaltmış ve gerilim profillerini iyileştirerek sistemin kararlılığını artırmıştır. Üç farklı baraya yerleştirilen rüzgâr türbinleri ile gerilim değeri 1.0975 pu olarak kaydedilmiştir. Rüzgâr türbinlerinin uygun boyutlandırılması ve konumlandırılması, dağıtım sistemlerinde hem gerilim stabilitesi hem de güç kalitesinin iyileştirilmesine olanak tanımıştır.

Genel olarak, bu çalışmanın bulguları, farklı türdeki DÜ ünitelerinin etkin bir şekilde konumlandırılması ve boyutlandırılması ile dağıtım sistemlerinde aktif ve reaktif güç kayıplarının azaltılabileceğini, gerilim profilinin iyileştirilebileceğini ve sistemde faz dengesinin sağlanabileceğini göstermiştir. Bu tür DÜ entegrasyon stratejileri, dağıtım sistemlerinin daha verimli, güvenilir ve sürdürülebilir olmasına katkı sağlamaktadır.

Gelecek çalışmalarda, DÜ'lerin dinamik yük koşulları altındaki performansları değerlendirilebilir ve farklı yük profilleriyle sistem kararlılığı analiz edilebilir. Ayrıca, farklı kontrol stratejilerinin kullanılmasıyla, PV sistemleri, rüzgâr türbinleri ve kapasitörlerin daha akıllı ve otonom yönetimi sağlanabilir. Bu bağlamda,

yapay zekâ tabanlı optimizasyon algoritmalarının kullanılmasıyla, DÜ ünitelerinin en uygun konumlandırılması ve boyutlandırılması sağlanarak, güç kayıplarının minimuma indirilmesi ve sistemin daha verimli hale getirilmesi amaçlanabilir. Bunun yanı sıra, gelecekteki araştırmalar, elektrikli araçlar (EV) ve enerji depolama sistemleri (ESS) gibi yeni nesil teknolojilerin DÜ sistemleriyle entegrasyonuna odaklanabilir. Bu tür yenilikçi sistemler, enerji yönetimi stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlayarak, dağıtım sistemlerinin esnekliğini ve güvenilirliğini artırabilir.

6. KAYNAKLAR

1. Çıkan, M. ve Nacar Çıkan, N. (2024). Elektrikli araç şarj istasyonlarının enerji dağıtım hatlarına optimum şekilde konumlandırılması. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(2), 340-363.
2. Nacar Cikan, N. & Cikan, M. (2024). Reconfiguration of 123-bus unbalanced power distribution network analysis by considering minimization of current & voltage unbalanced indexes and power loss. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 157, 109796.
3. Rezaee Jordehi, A. (2016). Allocation of distributed generation units in electric power systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 893-905.
4. Bawazir, R.O. & Cetin, N.S. (2020). Comprehensive overview of optimizing PV-DG allocation in power system and solar energy resource potential assessments. *Energy Reports*, 6, 173-208.
5. Cikan, M. & Nacar Cikan, N. (2023). Optimum allocation of multiple type and number of DG units based on IEEE 123-bus unbalanced multi-phase power distribution system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 144, 108564.
6. Cikan, M. & Kekezoglu, B. (2022). Comparison of metaheuristic optimization techniques including Equilibrium optimizer algorithm in power distribution network reconfiguration. *Alexandria Engineering Journal*, 61(2), 991-1031.
7. Cikan, M. & Dogansahin K. (2023). A comprehensive evaluation of up-to-date optimization algorithms on MPPT application for photovoltaic systems. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 45(4), 10381-10407.
8. Cikan, M. (2025). Maximum power point tracker design for photovoltaic systems under partial shading conditions by using cheetah optimizer algorithm. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 40(1), 555-572.
9. Cikan, M., Nacar Cikan, N. & Kekezoglu, B. (2025). Determination of optimal island regions with simultaneous DG allocation and reconfiguration in power distribution networks. *IET Renewable Power Generation*, 19, e12942.
10. Balu, K. & Mukherjee, V. (2023). Optimal allocation of electric vehicle charging stations and renewable distributed generation with battery energy storage in radial distribution system considering time sequence characteristics of generation and load demand. *Journal of Energy Storage*, 59, 106533.
11. Gümüş, T.E., Emiroglu, S. & Yalcin, M.A. (2023). Optimal DG allocation and sizing in distribution systems with Thevenin based impedance stability index. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 144, 108555.
12. Kandasamy, M., Thangavel, R., Arumugan, T., Kumarayel, S., Aruchamy, S., Kim, W.W. & Geem, Z.W. (2023). Strategic incorporation of DSTATCOM and distributed generations in balanced and unbalanced radial power distribution networks considering time varying loads. *Energy Reports*, 9, 4345-4359.
13. Pushkarna, M., Ashfaq, H., Singh, R. & Rajeev, K. (2024). An optimal placement and sizing of type-IV DG with reactive power support using UPQC in an unbalanced distribution system using particle swarm optimization. *Energy Systems*, 15, 353-370.
14. Cheng, J. & Waele De W. (2024). Weighted average algorithm: A novel meta-heuristic optimization algorithm based on the weighted average position concept. *Knowledge-Based Systems*, 305, 112564
15. IEEE Distribution Planning Working Group Report (1991). Radial Distribution Test Feeders. *Transactions on Power Systems*, 6(3), 975-985.

Mechanical Properties of LLDPE Composites Reinforced with Woven Horsehair Fabrics

Sümeyye ÜSTÜNTAĞ^{1,a}

¹Erciyes University, Faculty of Engineering, Department of Textile Engineering, Kayseri, Türkiye

^aORCID: 0000-0002-2625-4063

Article Info

Received : 02.01.2025

Accepted : 26.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665893

Corresponding Author

Sümeyye ÜSTÜNTAĞ

sumeyyeustuntag@erciyes.edu.tr

Keywords

Horsehair

Woven fabric

Composite

Ethylene vinyl acetate

Linear low-density polyethylene

How to cite: ÜSTÜNTAĞ, S., (2025).

Mechanical Properties of LLDPE

Composites Reinforced with Woven

Horsehair Fabrics. Cukurova University,

Journal of the Faculty of Engineering,

40(1), 99-109.

ABSTRACT

This study aims to enhance the mechanical properties of linear low-density polyethylene (LLDPE) based composites by utilizing fabrics woven from horse tail hair as reinforcement. The warp and weft thread comprised bundles containing 20 hairs each in fabric production. The warp density was kept constant while two different weft densities, 5 bundles/cm and 7 bundles/cm, were used. Plain and 2/1 twill were selected as the weave type. All fabrics, except for the reference sample, were coated with ethylene vinyl acetate (EVA). The coating increased the tensile strength of the composite in the weft direction by 11.69% compared to untreated fabrics. As the fabric's weft density increased, the tensile and flexural strength of the composites in the weft direction improved. A slight decrease in tensile strength was observed in the composites with the 2/1 twill weaving structure compared to the plain weaving, while an increase in flexural strength was noted with the plain weaving structure.

At Kılı Dokuma Kumaşlar ile Takviye Edilmiş LLDPE Kompozitlerin Mekanik Özellikleri

Makale Bilgileri

Geliş : 02.01.2025

Kabul : 26.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665893

Sorumlu Yazar

Sümeyye ÜSTÜNTAĞ

sumeyyeustuntag@erciyes.edu.tr

Anahtar Kelimeler

At kılı

Dokuma kumaş

Kompozit

Etilen vinil asetat

Doğrusal düşük yoğunluklu polietilen

Atıf şekli: ÜSTÜNTAĞ, S., (2025). *At Kılı*

Dokuma Kumaşlar ile Takviye Edilmiş

LLDPE Kompozitlerin Mekanik Özellikleri.

Çukurova Üniversitesi, Mühendislik

Fakültesi Dergisi, 40(1), 99-109.

ÖZ

Bu çalışma, takviye malzemesi olarak at kuyruğu kılından dokunmuş kumaşlar kullanarak doğrusal düşük yoğunluklu polietilen (LLDPE) bazlı kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Kumaş üretiminde çözgü ve atkı iplikleri olarak her biri 20 kıldan oluşan demetler kullanılmıştır. Çözgü sıklığı sabit tutulurken, iki farklı atkı sıklığı (5 demet/cm ve 7 demet/cm) kullanılmıştır. Dokuma tipi olarak 2/1 dimi ve düz dokuma seçilmiştir. Referans numune hariç tüm kumaşlar etilen vinil asetat (EVA) ile kaplanmıştır. Kaplama işlemi, işlenmemiş kumaşlara kıyasla kompozitin atkı yönündeki çekme dayanımını %11,69 oranında artırmıştır. Kumaşın atkı sıklığı arttıkça, kompozitlerin atkı yönündeki çekme ve eğilme dayanımları iyileşmiştir. 2/1 dimi dokuma yapısına sahip kompozitlerde, düz dokumaya kıyasla çekme dayanımında hafif bir azalma gözlemlenirken, eğilme dayanımında ise düz dokuma yapısıyla artış kaydedilmiştir.

1. INTRODUCTION

Fiber-reinforced polymer composites have attracted significant interest across various industries due to their excellent mechanical properties, low weight, and resistance to environmental degradation. Glass, carbon, and aramid fibers are extensively utilized as reinforcement materials in fiber-reinforced polymer (FRP) composites due to their exceptional mechanical properties and have long been applied in the aerospace, automotive, and marine industries [1,2]. The increasing awareness of environmental issues associated with synthetic materials has catalyzed a significant shift towards utilizing natural fibers in composite production. Natural fibers offer ecological advantages over synthetic fibers, such as biodegradability, renewability, and recyclability, as well as lower density, high flexibility, high impact resistance, comparable specific tensile properties, non-abrasiveness to equipment, and reduced energy consumption [2,3]. Natural fibers are categorized into plant-based, animal-based, and mineral-based fibers. Plant-based fibers such as flax, hemp, sisal, kenaf, jute, coconut, banana, and bamboo are commonly used in composite production [4-8]. Studies have shown that the specific strengths of flax, hemp, and jute fibers, which have particularly high mechanical properties, are competitive with glass fiber [1,9]. Using animal fibers in composite production is considerably lower than plant-based fibers [10]. Animal fibers include hair or wool, silk, and feather fibers. The growing emphasis on sustainability has made special fibers, such as horsehair, a research subject. Horsehair, sourced from the tails and manes of horses, is utilized in various industries due to its properties, including elasticity, compression resistance, and high strength [11]. However, research on using horsehair as a reinforcement material in composite production remains limited [12-16].

Natural fibers present considerable challenges when incorporated into polymer composites despite offering several advantages. A primary issue is the inherent incompatibility between hydrophilic natural fibers and hydrophobic polymer matrices, which results in poor interfacial adhesion and, consequently, reduces the mechanical properties of the composites. This incompatibility is aggravated by the moisture absorption characteristics of natural fibers, which can further weaken the fiber-matrix bond. These incompatibilities are resolved by various solutions, including chemical treatments such as alkali treatment, which enhance the surface properties of the fibers [17,18]. Coupling agents and compatibilizers play a crucial role in enhancing the interfacial bonding between fibers and the polymer matrix, thereby improving the overall mechanical performance of composites. Although coupling agents are often used directly during the mixing process, they can also be grafted onto the hydroxyl groups of the fibers or impregnated into the fibers before the production process [19,20].

The structure and arrangement of the reinforcement material influence the properties of fiber-reinforced composites. Woven fabric structures allow for a more compact arrangement of fibers, providing composite materials with high strength, impact resistance, and flexibility. The study used plain and twill woven fabrics made from horsetail hair to reinforce the linear low-density polyethylene (LLDPE) matrix. To improve adhesion between the reinforcement material and LLDPE, the horsehair woven fabrics were coated with ethylene vinyl acetate (EVA). EVA is a copolymer composed of a hydrophobic (nonpolar) polyethylene (PE) monomer and a flexible, hydrophilic (polar) vinyl acetate (VA) monomer. It provides low-temperature flexibility, toughness, and strong adhesion to various materials. The VA group, which provides flexibility and adhesion to the copolymer, is expected to interact with the hydrophilic -OH group on horsehair, while the PE group bonds with LLDPE. The thickness, weight, morphological structure, mechanical properties, and thermal behavior of horsehair-woven fabric-reinforced EVA/LLDPE composites were examined.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Materials

LLDPE, with a density of 0.92 g/cm³, a melt flow index of 1.0 g/10 min, and a melting point of 120°C, was sourced from Ozugur Plastik Ltd. Sti. EVA, with a vinyl acetate content of 18% (REPSOL PRIMEVA® P1820C), a density of 0.937 g/cm³, a melt flow rate of 2 g/10 min (at 190°C and 2.16 kg), and a melting point of 87°C, was purchased from Resinex. Chloroform (99%, EMSURE® ACS, ISO, Reag. Ph Eur) as a solvent was bought from Sigma-Aldrich. Washed and disinfected horse tail hairs were obtained from Barış Firça Ind. Trade. Co. Ltd.

2.2. Production and Pre-Treatment of Fabrics

For fabric production, horsetail hair was grouped into bundles of 20 each for warp and weft use. The fabrics were woven on a handloom with two bundles/cm fixed warp density. Plain fabrics were produced with two planned weft densities of 5 bundles/cm and 7 bundles/cm, while twill fabrics were woven with 7 bundles/cm. To prevent the fabrics from fraying during composite production, the edges of the 18×25 cm² test area were secured with double stitching, 1 cm inward, using a Singer sewing machine. The weave type, the measured weft density, thickness, and weight of the produced fabrics are presented in Table 1.

Table 1. The physical parameters of horsehair woven fabrics

Sample codes	Weave type	Weft density (bundles /cm)	Thickness (mm)	Weight (g/m ²)
P5	Plain	4.87	1.41	487
E-P5	Plain	4.77	1.41	511
E-P7	Plain	7.30	1.79	674
E-T7	Twill (2/1)	7.80	2.17	696

The woven fabrics were coated with EVA to enhance compatibility with LLDPE. Before the coating process, the fabrics were conditioned in an oven at 40°C for 24 hours, and their initial weights were recorded. EVA (40 wt%) was dissolved in chloroform with a magnetic stirrer for 30 minutes at 60°C and 80 rpm. The solution, prepared at a 50:1 liquid-to-fabric ratio, was poured over the fabric, placed on a plate, and left sealed at room temperature for 15 minutes. The fabric, with one side coated, was dried in an oven at 40°C for 24 hours. The same procedure was applied to the other side of the fabric. The weight of the treated fabrics was measured, and the amount of EVA coating was determined relative to the initial dry weight of the untreated fabric. Except for the reference fabric coded as P5, all other fabrics were coated with EVA and are represented by the letter "E" in the fabric code.

2.3. Production of Composite Samples

The composites were fabricated by compression molding using a laboratory hot press (GULNAR MAKINA, Istanbul, Türkiye), where the fabrics were placed between two LLDPE sheets and compressed at 125°C and 4 bar pressure for 15 minutes using a 2 mm thick mold. The composites were allowed to cool slowly to room temperature under pressure for 6 hours. The LLDPE sheets were produced by placing them in a 1 mm thick mold and heating them at 130°C under 4 bar pressure for 15 minutes. Before the composite production, the fabrics were conditioned in an oven at 40°C for 24 hours (Figure 1).

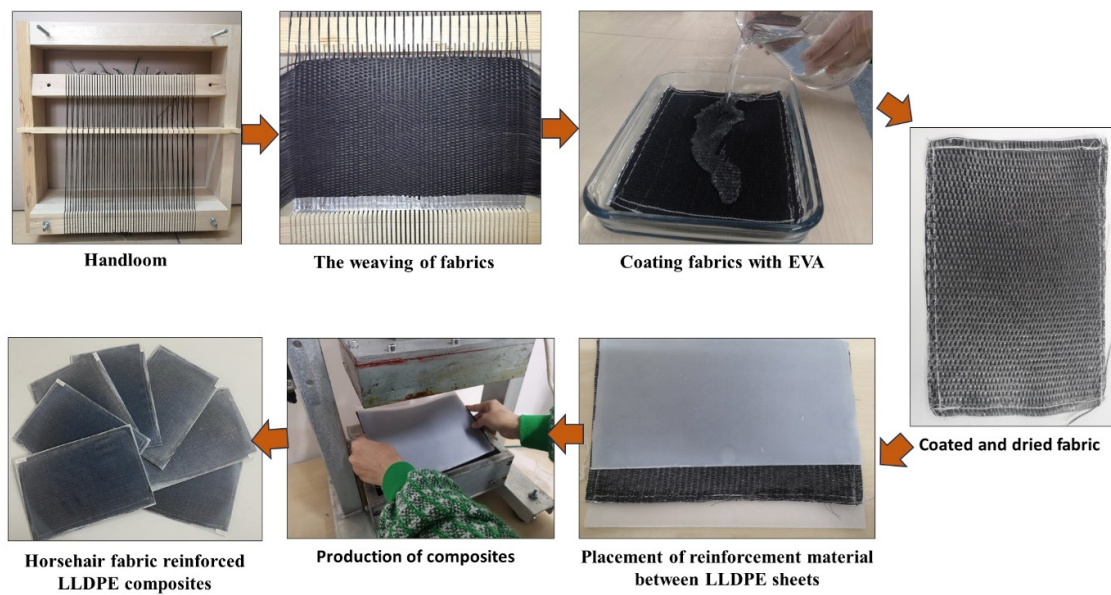


Figure 1. The production stages of composite samples

Table 2 presents the thickness, weight, and composition ratios of the composite samples. "P" represents plain weaving, while "T" indicates twill weaving. The numbers 5 and 7 correspond to the planned weft densities. "E" refers to the coating process with EVA, and "L" denotes the LLDPE matrix. For example, "LE-T7" indicates a composite structure reinforced with twill fabric made from horsehair treated with EVA and embedded in LLDPE sheets.

Table 2. The physical parameters of composite samples

Composite codes	Horsehair (%)	LLDPE (%)	EVA (%)	Thickness (mm)	Weight (kg/m ²)
LLDPE sheet	0.00	100.00	0.00	2.31	1.94
L-P5	21.83	78.17	0.00	2.55	2.55
LE-P5	22.34	74.33	3.33	2.60	2.60
LE-P7	28.28	65.54	2.18	2.85	2.85
LE-T7	27.56	69.87	2.57	2.90	2.90

2.4. Characterization of Composite Samples

Thermogravimetric analysis (TGA) and derivative TGA (DTGA) were performed using a thermogravimetric analyzer (Perkin Elmer, DIAMOND). The tests were conducted under a nitrogen atmosphere with 5 mg samples, heated from 23°C to 600°C at a flow rate of 10°C/min.

Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM, ZEISS, GEMINI 500) was employed at an acceleration voltage of 5 kV to analyze the fracture surfaces of the composites and investigate the hair/matrix interactions. Before analysis, the sample surfaces were coated with an Au/Pd alloy under vacuum using a sputter coater.

The tensile properties of the developed composites were evaluated using a 50 kN capacity universal testing machine (Shimadzu AGX, Japan) following ASTM D 638-14 standards. Rectangular specimens (165 × 13 × thickness mm³) were tested at a crosshead speed of 5 mm/min with a grip separation of 100 mm. Flexural testing was carried out according to standard ASTM D790-10. The samples (13 × 125 × thickness mm³) were subjected to a three-point bending test, where the ram was loaded at a rate of 2 mm/min until fracture occurred.

A hair pull-out test was conducted on Shimadzu AGX to evaluate the hair and LLDPE interface characteristics. In the samples prepared according to the structure shown in Figure 2, the section labeled "a" was opened, and a single hair from the middle part of the sample was attached to the upper grip of the machine. The section labeled "c" was attached to the lower grip. The hair was pulled at a rate of 2 mm/min under a load of 5 kN, and the evaluation was based on the detachment or breakage of the hair from the structure.

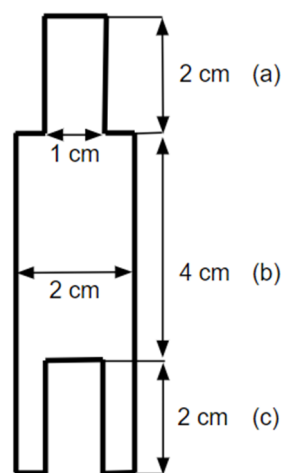


Figure 2. The sample dimensions prepared for a hair pull-out test to evaluate interface properties

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. TGA/DTGA Analysis

The TGA and DTGA curves for the LE-P5 composite and its components are shown in Figure 3. The degradation of horsehair and EVA occurs in two distinct steps. The first step of horsehair degradation, likely due to the water loss in the structure, occurs at approximately 220°C with an initial weight loss of about 8%. The second step, which is taken in the temperature range of 220-500°C, results in a weight loss of approximately 64%. At this stage, the complete degradation of keratin is expected to occur. Due to the carbon content and mineral components in horsehair, about 30% of the residue remains at 800°C. EVA remains thermally stable up to 280°C. The first mass loss of 22%, observed between 280°C and 380°C, corresponds to the deacetylation of the VA group. This step results in the release of acetic acid into the gas phase. The second mass loss step of 77% (between 400 and 497°C) is attributed to the oxidation of hydrocarbons resulting from the degradation of the main polyethylene chain, which leads to their volatilization [21,22]. LLDPE maintains thermal stability up to 400°C, after which it loses 98% of its weight in the temperature range of 400-500°C.

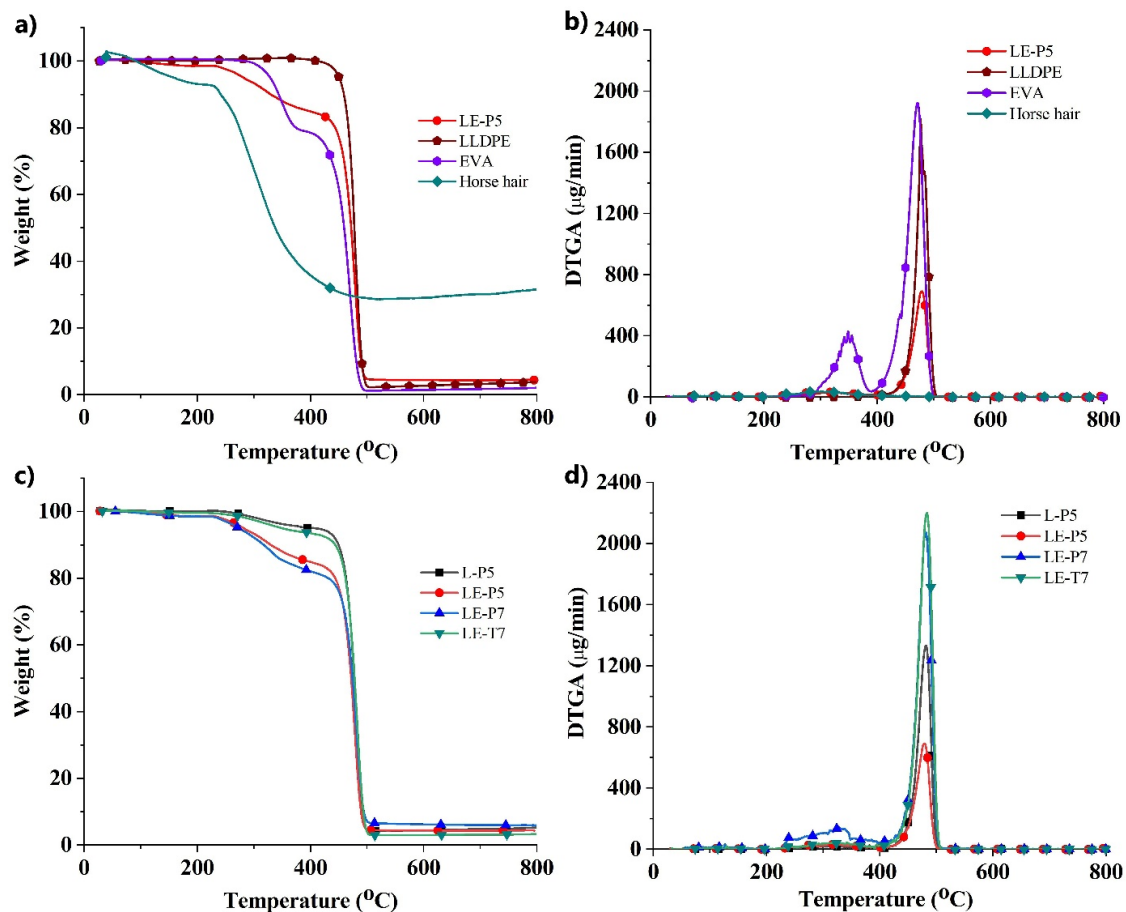


Figure 3. TGA (a, c) and DTGA (b, d) curves for composite samples and their components

The LE-P5 composite degrades in three steps. The first step occurs at 233°C, where the weight decreases by 2%. This step corresponds to the removal of water molecules present in the horsehair component. The initial weight loss is negligible since the fabrics were dried before being incorporated into the composite. The second step, occurring between 233-433°C, causes a 16% weight loss and corresponds to the first degradation stage of EVA and the second degradation stage of horsehair. The third step, between 433°C and 500°C, results in about 78% weight loss, representing the final degradation phase of EVA and LLDPE. Other composite structures (LE-P5, LE-P7, and LE-T7) show similar thermal degradation stages (Figure 3c and 3d). The inclusion of EVA in the composite generally reduces the thermal stability. However,

composite containing twill weaving fabrics (LE-T7) maintain their thermal stability despite the addition of EVA.

3.2. Tensile Properties

In the production of horsehair woven fabrics, weft density was chosen as a variable parameter, while warp density was kept constant. The tensile stress-strain curves of the composite samples in the weft direction are illustrated in Figure 4, while their respective values are listed in Table 3. Figure 4 demonstrates that pure LLDPE undergoes ductile rupture, whereas composites with reinforcing materials fail in a brittle manner due to rapid crack propagation. The LLDPE sheet was determined to have a tensile strength of 10.18 MPa, an elongation at break of 34.27%, and a modulus of 0.31 GPa. The reinforcement of the LLDPE sheet with horsehair woven fabrics generally increased the tensile strength and elastic modulus and decreased the elongation at break in the weft direction. The addition of untreated horsehair fabric with a weft density of 5 bundles/cm (L-P5) resulted in a 93.23% increase in tensile strength, a 414.56% decrease in elongation at break, and a 141.3% increase in elastic modulus in the weft direction. To improve the adhesion between the horsehair woven fabrics and the matrix material, all fabrics except the L-P5 coded fabric were coated with EVA. The 200X and 40X magnified images of untreated (a, b) and coated (d, e) fabrics are shown in Figure 5. The FE-SEM images demonstrate that the fabric surface is completely coated. The sample reinforced with EVA-coated fabric, having a weft density of 5 bundles/cm (LE-P5), exhibits a tensile strength of 21.97 MPa and a tensile modulus of 0.64 GPa. The EVA coating increased the tensile strength of the composite in the weft direction by 11.69% compared to untreated fabrics (L-P5). The increase can be attributed to the improved interfacial bonding between the fabric and the matrix. As a more flexible and adhesive material than LLDPE, EVA likely enhances the interaction between the fabric fibers and the polymer matrix. Additionally, the coating could reduce defects or weak spots in the matrix, leading to higher tensile strength. When the fabric was coated with EVA, the elongation at break of the composite increased by 75.23%. The coating likely enhanced the overall ductility and flexibility of the composite, improving its ability to stretch and absorb stress before failure. In contrast, the elastic modulus decreased by 14.67% with the coating. The EVA coating may have softened the overall structure of the composite, leading to a decrease in its ability to resist elastic deformation under stress. Figure 5 shows the fracture morphology corresponding to the composites reinforced with untreated fabric (L-P5) and coated fabrics (LE-P5). The L-P5 coded sample exhibits fiber fracture, pull-out, and debonding. With the fabric coating, the majority of the fibers are observed to break, while the matrix fractures in a more ductile manner. These morphological analyses are consistent with the tensile test results.

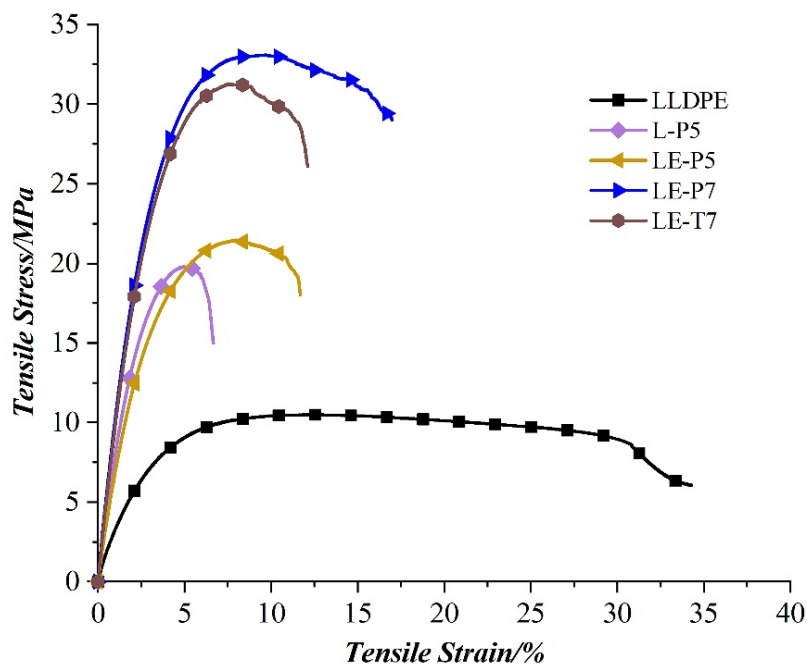


Figure 4. Tensile stress-strain curves of composite samples in the weft direction

Table 3. Tensile strength, elongation at break, and elastic modulus values of composite samples

Samples		Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile modulus (GPa)
LLDPE	-	10.18	34.27	0.31
L-P5	weft	19.67	6.66	0.75
	warp	10.89	7.14	0.40
LE-P5	weft	21.97	11.67	0.64
	warp	10.97	7.93	0.45
LE-P7	weft	32.62	16.98	0.97
	warp	9.64	10.91	0.38
LE-T7	weft	30.99	12.09	0.94
	warp	8.72	8.31	0.34

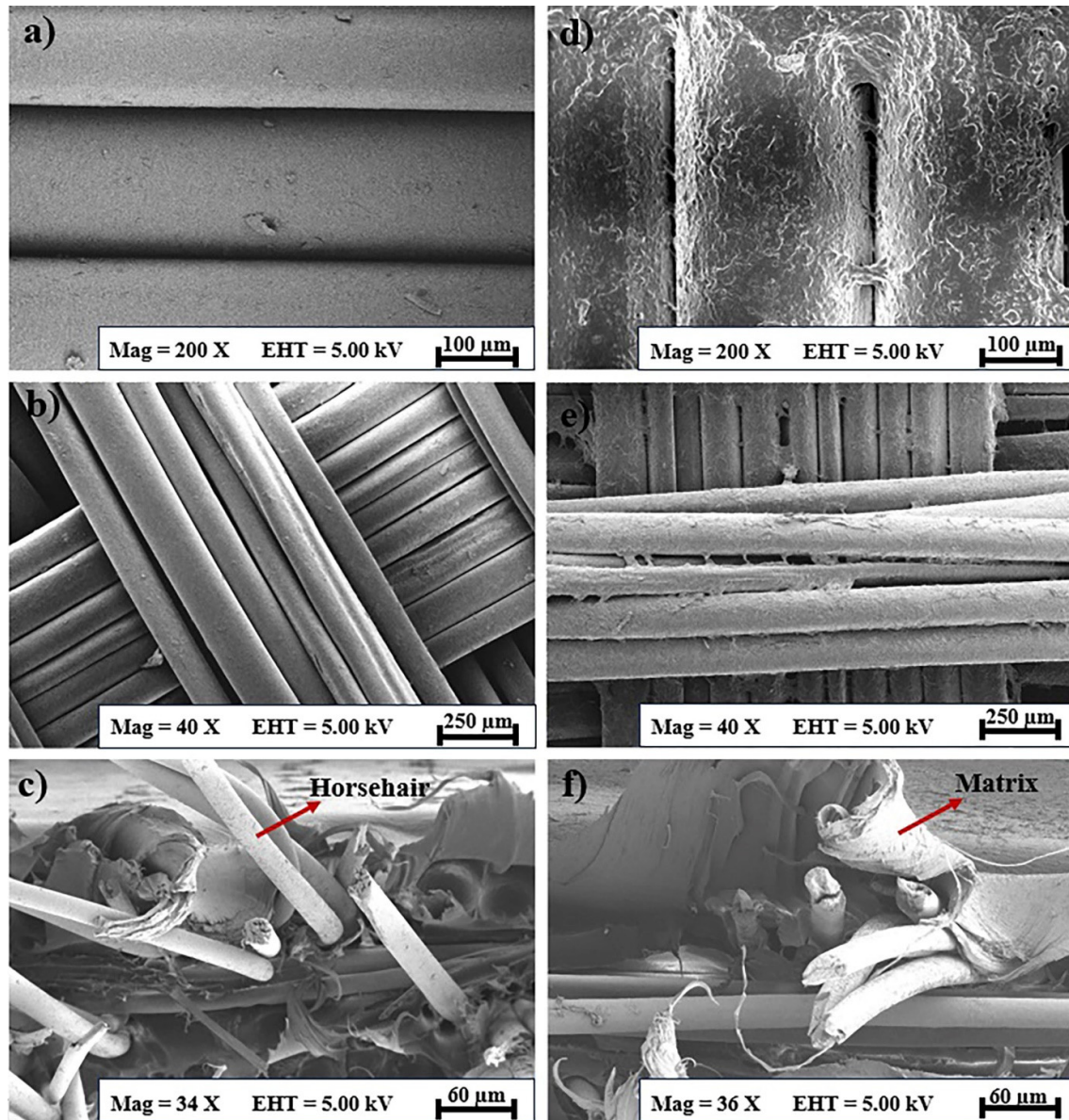


Figure 5. FE-SEM micrographs of untreated (a, b) and EVA-treated (d, e) fabrics at 200X and 40X magnifications; micrographs of tensile fracture surfaces of composites in the weft direction (c) L-P5 at 34X and (f) LE-P5 composites at 36X

The sample reinforced with EVA-coated fabric having a weft density of 7 bundles/cm (LE-P7) exhibited the highest tensile strength of 32.62 MPa and the highest elastic modulus of 0.97 GPa. The increase in weft

density enhanced the tensile strength, elongation at break, and elastic modulus in the weft direction by 48.47%, 45.50%, and 51.56%, respectively. The increased horsehair density enables the fabric to carry more load, thereby improving stress distribution and load transfer between the fabric and the matrix.

The sample reinforced with twill weaving fabric having a weft density of 7 bundles/cm (LE-T7) exhibited a slight decrease of 4.9% in tensile strength compared to plain weaving fabric. The twill weaving structure caused a 40.45% reduction in elongation at break and a 3.09% decrease in elastic modulus. The diagonal twill weaving structure creates a more irregular surface, which may have caused micro-scale voids between the fabric and LLDPE sheets during composite production. These small voids could hinder interfacial bonding between the fabric and the matrix, potentially reducing stress transfer efficiency along the interface.

Table 3 presents the mechanical properties of composites in the warp direction of the reinforcement fabric. The horsehair warp density has been constant at two bundles/cm, depending on the handloom. The tensile strength of the samples with codes L-P5 and LE-P5 in the warp direction was found to be 6.97% and 7.76% higher, respectively, compared to the LLDPE sheet. However, when the horsehair density increased in plain and twill weaving fabrics, the tensile strength was lower than in the pure LLDPE sheet. The lower warp density may limit the load-bearing capacity of the warp threads, leading to reduced tensile strength in that direction. Moreover, the crimping of the threads also affects tensile strength [23]. The increase in weft density may have increased the crimp effect, which could have limited the load-bearing capacity of the fewer warp threads.

3.3. Adhesion Degrees of the Reinforcement Material

The adhesion degree of the reinforcement material within the composite samples was evaluated based on the occurrence of breaking or debonding of a single hair underload. The hairs were selected from the center of the bundle in the weft direction. Three repetitions were performed for each sample, and the adhesion degree was determined according to the number of hairs that broke. According to the values presented in Table 4, no significant difference in adhesion degree was observed between the samples with and without EVA. However, the samples with a plain weaving structure exhibited better adhesion than those with twill weaving. This is thought to be due to the higher number of weaving intersections per unit area in plain weaving, which increases friction and improves adhesion. Additionally, this result indicates that the matrix penetrates less into the inner parts of the fabric in the twill weave structure.

Table 4. Adhesion degrees based on the behavior of hairs pulled from the samples

Samples	1	2	3	Adhesion degree
L-P5	Debonding	Breaking	Debonding	1
LE-P5	Debonding	Debonding	Breaking	1
LE-P7	Debonding	Breaking	Breaking	2
LE-T7	Debonding	Debonding	Debonding	0

The tensile strength and elongation at break values of the hairs debonded from the structure are presented in Table 5. According to these results, the EVA-coated reinforcement demonstrated higher resistance than its uncoated counterpart. As the number of bundles in the structure increased, the adhesion degree was generally negatively affected. This may be attributed to a reduction in the penetration of the matrix material into the reinforcement or an insufficient matrix-to-reinforcement ratio within the composite.

Table 5. Maximum stress and elongation values of hairs debonded from the structure

Samples	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
L-P5	0.09	17.93
LE-P5	0.12	27.69
LE-P7	0.07	20.09
LE-T7	0.04	11.48

3.4. Flexural Properties

The flexural stress-strain curves in the weft direction for fabric-reinforced composites are presented in Figure 6. Table 6 presents the flexural strength, flexural strain, and flexural modulus in both the weft and warp directions. Overall, the reinforcement material increased the flexural resistance in the weft direction. The untreated fabric with a density of 5 bundles/cm improved the flexural strength in the weft direction by 5.67%, while the treated fabric with the same density enhanced it by 8.56%. The reinforcement material generally increased the flexural modulus. The flexural modulus of the L-P5 composite sample in the weft direction was 1.30 GPa, while that of the LE-P5 composite sample was 1.19 GPa. The EVA coating slightly reduced the flexural modulus. The EVA layer gave additional flexibility to the composite structure and reduced its overall stiffness.

The composite reinforced with coated fabrics having a weft density of 7 bundles/cm exhibited a flexural strength of 11.06, a bending strain of 3.69%, and a flexural modulus of 0.83 GPa in the weft direction. The flexural strength and bending strain improved as the horsehair density increased, while the flexural modulus slightly decreased. The LE-T7 coded twill fabric with a weft density of 7 bundles/cm was found to have the highest flexural modulus, measured at 12.67 MPa in the weft direction. With its diagonal arrangement of thread, twill weaving enables a more homogeneous distribution of vertical loads. Additionally, the LE-T7 sample exhibited a flexural strain of 3.43% and a flexural modulus of 1.07 GPa in the weft direction.

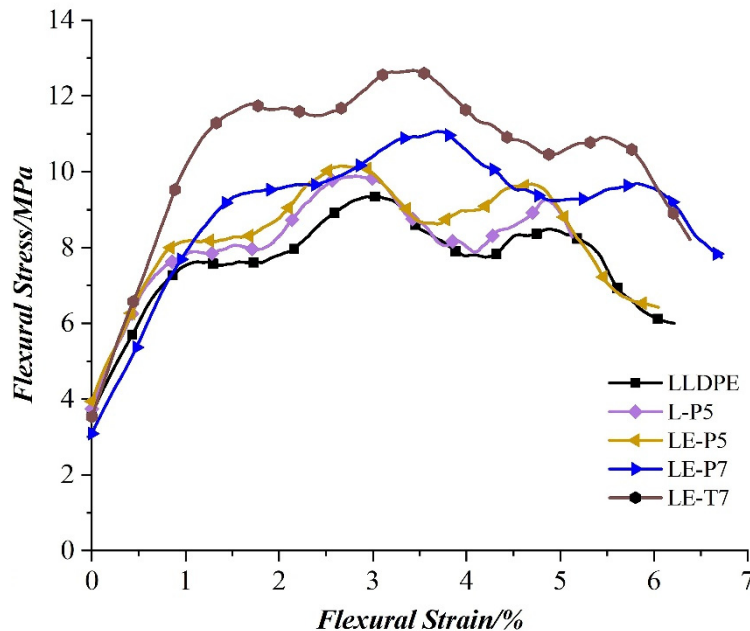


Figure 6. Flexural stress-strain curves of composite samples in the weft direction

Table 6. Flexural strength, flexural strain, and flexural modulus values of composite samples

Samples		Flexural strength (MPa)	Flexural strain (%)	Flexural modulus (GPa)
LLDPE	-	9.35	3.05	1.00
L-P5	weft	9.88	2.82	1.30
	warp	8.03	2.70	1.06
LE-P5	weft	10.15	2.88	1.19
	warp	9.34	3.12	0.98
LE-P7	weft	11.06	3.69	0.83
	warp	8.24	3.25	0.79
LE-T7	weft	12.67	3.43	1.07
	warp	6.97	4.28	0.71

The flexural strength values of the composites in the warp direction were lower than those of the matrix material. Furthermore, an increase in the weft density of the fabrics resulted in a deterioration of the flexural strength and flexural modulus of the composites in the warp direction. The low warp density and the resulting unbalanced structure may have contributed to this outcome.

4. CONCLUSIONS

The present study investigates the thermal and mechanical properties of LLDPE composites reinforced with horsehair woven fabrics, with a focus on the influence of fabric structure (plain and twill), weft density (5 and 7 bundles/cm), and surface treatment with EVA.

Including untreated and coated horsehair-woven fabrics slightly reduced the thermal stability of the composite structure. The reinforcement with horsehair-woven fabrics significantly enhanced the mechanical properties of the composites. The EVA coating enhanced the interfacial bonding between the fabric and the polymer matrix, resulting in higher tensile strength and elongation at break while reducing the tensile modulus by increasing the ductility of the composite in the weft direction. Furthermore, FE-SEM analysis revealed that composites reinforced with coated fabrics predominantly exhibited fiber breakage. Increasing the fabric's weft density improved the composites' mechanical properties in the weft direction. The composite reinforced with EVA-coated fabric with a weft density of 7 bundles/cm demonstrated the highest tensile strength of 32.62 MPa and an elastic modulus of 0.97 GPa in the weft direction. The use of twill weaving fabrics decreased tensile strength and modulus, likely due to the irregular surface structure and the formation of voids between the fabric and matrix. Despite this, the composite reinforced with twill fabrics exhibited the highest flexural strength of 12.67 MPa in the weft direction. Since the warp density of the composites is considerably lower than the weft density, no significant improvement was observed in the tensile and flexural properties in the warp direction; instead, these properties worsened as the weft density increased. The findings suggest that for optimal performance, careful selection of horsehair fabric structure and density, as well as matrix treatment, is essential for tailoring the properties of the composite material for specific applications.

5. ACKNOWLEDGMENT

The author thanks the financial support of the Scientific Research Projects Unit of Erciyes University (Project number is FBA-2022-11711). I would like to thank Erciyes University Dean of Research for providing the necessary infrastructure and laboratory facilities at the ArGePark research building. I would also like to express my gratitude to the late Prof. Dr. Nazim Paşayev for his support.

6. REFERENCES

1. Li, X., Tabil, L. G. & Panigrahi, S. (2007). Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: A Review. *Journal of Polymers and the Environment*, 15, 25-33.
2. Kerni, L., Singh, S., Patnaik, A. & Kumar, N. (2020). A review on natural fiber reinforced composites. *Materials Today: Proceedings*, 28, 1616-1621.
3. Ganguly, A., Shankar, S., Das, A., Shukla, M., Swaroop, C. & Bhardwaj, T. (2022). Natural fibre reinforced composites: A review based on additive manufacturing routes and biodegradability perspective. *Materials Today: Proceedings*, 62, 131-135.
4. Jha, A., Thite, A., Bhardwaj, Y.K., Pant, H.J. & Choedhury, S.R. (2022). Radiation assisted development of linear low-density polyethylene/flax fibre composites by designing interface. *Journal of Composite Materials*, 56(28) 4259-4273.
5. Dahal, R.K., Acharya, B. & Dutta, A. (2022). Mechanical, thermal, and acoustic properties of hemp and biocomposite materials: A review. *Journal of Composites Science*, 6(12), 373.
6. Xanthopoulou, E., Chrysafi, I., Polychronidis, P., Zamboulis, A. & Bikiaris, D.N. (2023). Evaluation of eco-friendly hemp-fiber-reinforced recycled HDPE composites. *Journal of Composites Science*, 7(4), 138.
7. Rajendran, S., Shanmugam, V., Palani, G., Marimuthu, U., Veerasimman, A., Korniejenko, K., Oliinyk, I., Trilaksana, H. & Sundaram, V. (2024). Investigation on erosion resistance in polyester-jute composites with red mud particulate: Impact of fibre treatment and particulate addition. *Polymers*, 16(19), 2793.

8. Adin, H., Adin, M.Ş. (2022). Effect of particles on tensile and bending properties of jute epoxy composites. *Materials Testing*, 64(3), 401-411.
9. Li, M., Pu, Y., Thomas, V.M., Yoo, C.G., Ozcan, S., Deng, Y., Nelson, K. & Ragauskas, A.J. (2020). Recent advancements of plant-based natural fiber-reinforced composites and their applications. *Composites Part B*, 200, 108254.
10. Mishra, T., Mandal, P., Rout, A.K. & Sahoo, D. (2022). A state-of-the-art review on potential applications of natural fiber-reinforced polymer composite filled with inorganic nanoparticle. *Composites Part C: Open Access*, 9, 100298.
11. Rajbhar, S., Alam, S. & Srivastava, R. (2016). Fabrication & characterization of animal hair and human hair reinforced epoxy composite. *International Journal of Scientific Processes Research and Application (IJSPRA)*, 2(2), 18-22.
12. Kumar, N., Singh, A. & Ranjan, R. (2019). Fabrication and mechanical characterization of horse hair (HH) reinforced polypropylene (PP) composites. *Materials Today: Proceedings*, 19, 622-625.
13. Kumar, N., Singh, A., Debnath, K. & Ranjan, R. (2020). Mechanical characterization of animal fibre-based composites. *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 45, 293-297.
14. Sam, A.R.M., Usman, J., Akbar, S. & Yusoff, I.M. (2016). Properties of mortar reinforced with natural horse hair and kenaf fibres. *Malaysian Journal of Civil Engineering*, 28(2), 300-314.
15. Ratna, S. & Misra, S. (2017). An experimental study of mechanical behavior of natural fiber reinforced polymer matrix composites. *2nd International Conference on Condensed Matter and Applied Physics (ICC)*, 1953, 090010-1-090010-4.
16. Singhi A. & Devaraj, V. (2017). The tribological and mechanical behaviour of horsehair strengthened composite. *IJSRD-International Journal for Scientific Research & Development*, 5(9), 2321-0613.
17. Conzatti, L., Giunco, F., Stagnaro, P., Patrucco, A., Tonin, C., Marano, C., Rink, M. & Marsano, E. (2014). Wool fibres functionalised with a silane-based coupling agent for reinforced polypropylene composites. *Composites, Part A*, 61, 51-59.
18. Das, S. (2017). Mechanical properties of waste paper/jute fabric reinforced polyester resin matrix hybrid composites. *Carbohydrate Polymers*, 172, 60-67.
19. Baykus, O., Mutlu, A. & Doğan, M. (2016). The effect of pre-impregnation with maleated coupling agents on mechanical and water absorption properties of jute fabric reinforced polypropylene and polyethylene biocomposites. *Journal of Composite Materials*, 50(2), 257-267.
20. Xie, Y., Hill, C.A.S., Xiao, Z., Militz, H. & Mai, C. (2010). Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(7), 806-819.
21. Costache, M.C., Jiang, D.D., & Wilkie, C.A. (2005). Thermal degradation of ethylene-vinyl acetate copolymer nanocomposites. *Polymer*, 46(18), 6947-6958.
22. Gu, P., Zhang, J. (2022). Vinyl acetate content influence on thermal, non-isothermal crystallization, and optical characteristics of ethylene-vinyl acetate copolymers. *Iranian Polymer Journal*, 31(8), 905-917.
23. Kashif, M., Hamdani, S.T.A., Nawab, Y., Asghar, M.A., Umair, M., & Shaker, K. (2018). Optimization of 3D woven preform for improved mechanical performance. *Journal of Industrial Textiles*, 48(7), 1206-1227.



Performance Analysis of Additive Manufacturing of Electrodes via Selective Laser Sintering for Green Hydrogen Production

Fırat EKİNCİ^{1,a}, Mehmet Erman MERT^{2,b}, Hüseyin NAZLIGÜL^{1,c},
Başak DOĞRU MERT^{1,d}, Burak ESENBOĞA^{3,e}, Abdurrahman YAVUZDEĞER^{1,f}

¹Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Engineering Faculty, Department of Energy Systems Engineering, Adana, Türkiye

²Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Advanced Technology Research and Application Center, Adana, Türkiye

³Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Engineering Faculty, Department of Electrical & Electronics Engineering, Adana, Türkiye

^aORCID: 0000-0002-4888-7881; ^bORCID: 0000-0002-0114-8707; ^cORCID: 0000-0003-3037-8568;

^dORCID: 0000-0002-2270-9032; ^eORCID: 0000-0002-7777-259X; ^fORCID: 0000-0001-8058-4672

Article Info

Received : 18.02.2025

Accepted : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665920

Corresponding Author

Hüseyin NAZLIGÜL

hnazligul@atu.edu.tr

Keywords

Hydrogen production

Alkaline electrolysis

Selective laser sintering

Additive manufacturing

Wind turbine

How to cite: EKİNCİ, F., MERT, M.E., NAZLIGÜL, H., DOĞRU MERT, B., ESENBOĞA, B., YAVUZDEĞER, A., (2025). Performance Analysis of Additive Manufacturing of Electrodes via Selective Laser Sintering for Green Hydrogen Production. *Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering*, 40(1), 111-126.

ABSTRACT

Standard electrodes have limitations in design flexibility, production time, cost, material waste, and customization. Additive manufacturing overcomes these barriers, offering an efficient, cost-effective, and environmentally friendly approach to manufacturing electrochemical components. This study explores the usability of selective laser sintering for producing electrodes for green hydrogen production, focusing on emergency applications and prototype development. A honeycomb-structured metal cathode for alkaline electrolysis is 3D-printed and tested for tensile strength. Electrochemical methods, including cyclic voltammetry, linear sweep voltammetry, and chronoamperometry, evaluate its catalytic performance against graphite and platinum electrodes. For a 30-minute electrolysis period, the volume of hydrogen gas values for selective laser sintering manufactured cathode electrodes @ 2.4, 2.7, and 3 V are 10.5, 19.75, and 28.5 mL, respectively. Results show superior performance compared to literature. Additionally, wind turbine models (NACA12, NACA15, NACA18) are analyzed for hydrogen production efficiency, with NACA12 proving most effective at moderate to high wind speeds.

Yeşil Hidrojen Üretimi için Seçici Lazer Sinterleme Yoluyla Elektrotların Eklemeli İmalatının Performans Analizi

Makale Bilgileri

Geliş : 18.02.2025

Kabul : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665920

Sorumlu Yazar

Hüseyin NAZLIGÜL

hnazligul@atu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Hidrojen üretimi

Alkalın elektroliz

Seçici lazer sinterleme

Eklemeli imalat

Rüzgar türbini

Atf şekli: EKİNCİ, F., MERT, M.E., NAZLIGÜL, H., DOĞRU MERT, B., ESENBOĞA, B., YAVUZDEĞER, A., (2025). Yeşil Hidrojen Üretimi için Seçici Lazer Sinterleme Yoluyla Elektrotların Eklemeli İmalatının Performans Analizi. *Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 40(1), 111-126.

ÖZ

Standart elektrotlar tasarım esnekliği, üretim süresi, maliyet, malzeme israfı ve özelleştirme açısından sınırlamalara sahiptir. Eklemeli imalat tekniği bu engelleri aşarak elektrokimyasal bileşenlerin üretiminde verimli, uygun maliyetli ve çevre dostu bir yaklaşım sunar. Bu çalışma, acil durum uygulamalarına ve prototip geliştirmeye odaklanarak yeşil hidrojen üretimi için elektrot üretmek amacıyla seçici lazer sinterlemenin kullanılabilirliğini araştırmaktadır. Alkali elektroliz için petek yapılı bir metal katot 3 boyutlu olarak yazdırılır ve çekme dayanımı açısından test edilmiştir. Döngüsel voltammetri, doğrusal tarama voltammetrisi ve kronoamperometri dahil olmak üzere elektrokimyasal yöntemler, grafit ve platin elektrotlara karşı katalitik performansını değerlendirilmiştir. 30 dakikalık bir elektroliz süresi için, seçici lazer sinterleme ile üretilen katot elektrotları için hidrojen gazı hacmi değerleri @ 2,4, 2,7 ve 3 V sırasıyla 10,5, 19,75 ve 28,5 mL'dir. Sonuçlar, literatüre kıyasla üstün performans göstermektedir. Ayrıca, hidrojen üretim verimliliği açısından rüzgar türbini modelleri (NACA12, NACA15, NACA18) analiz edilmiş ve NACA12'nin orta ila yüksek rüzgar hızlarında en etkili olduğu kanıtlanmıştır.

1. INTRODUCTION

Renewable energy and hydrogen are crucial to tackling climate change, as both offer sustainable, emission-free solutions to meet our growing energy needs and decarbonize many sectors of the economy [1-3]. The integration of wind energy to produce alkaline hydrogen holds great promise for the future as it enables the effective storage of surplus renewable energy and the provision of a clean and versatile energy carrier, facilitating the transition to a sustainable and decarbonized energy ecosystem [4,5]. The installation of wind powered electrolysis cells is crucial, especially in situations where conventional power plants cannot provide energy during natural disasters such as earthquakes, as they offer a resilient and sustainable solution for continuous energy generation and storage. The biggest bottleneck in the installation of such a system often occurs during the electrolyzer set-up phase due to the challenges of electrode manufacturing, system integration and, if present, additional complexities. Additive manufacturing technology offers a valuable solution in this context. 3D printing simplifies electrode production by enabling the individual and rapid manufacture of complex components, reducing material waste and facilitating on-demand manufacturing, which ultimately optimizes the efficiency and cost-effectiveness of the system [6-13]. The main advantage is that it can be used to manufacture metal electrodes. One advantage of 3D printed metal electrodes is the ability to create complex and personalized electrode designs that improve the performance and efficiency of many electrochemical processes. In addition, the rapid prototyping and iteration capabilities of 3D printing allow for faster creation and improvement of electrode designs. In addition, this method can provide affordable and environmentally friendly solutions for electrode manufacturing while reducing material waste. It offers instant 3D printing and the desired geometry [14-17]. The parameters influencing hydrogen production in alkali electrolysis include electrolyte concentration, temperature, electrode geometry and material selection [18,19]. Fatouh et al [20] focused on evaluating hydrogen production from an alkali electrolyzer under various operating and geometric parameters. The study aims to determine the optimal conditions for efficient hydrogen generation by considering factors such as electrolyte concentration, temperature, electrode shape, and material. The experimental results show that a 26% concentration of KOH electrolyte, a temperature of 70°C, and an input voltage of 11 V lead to the highest hydrogen production rate, with smooth cylindrical aluminum electrodes of larger diameter being the most suitable choice for the electrolyzer operation. The study of Gillespie and Kriek [21] demonstrates the high performance of a membraneless DEFT alkaline electrolyzer, featuring a nickel oxide-coated anodic electrode and pure nickel cathodic electrode, achieving a remarkable current density of 508 mA cm⁻² at 2 VDC. While the gas purity in the system is currently limited due to gas/liquid separation constraints, the technology exhibits stable gas purities across various current density levels, showing promise for integration with renewable energy sources. Gonzalez-Buch et al. [22] carried out investigation in which the significance of 3D electrode structure was underlined. Ni and NiMo metallic coatings were electrodeposited onto a stainless steel AISI 304 substrate using a double-template electrochemical process, and their performance as H₂-evolving cathodes was assessed in a 30% KOH solution at varying temperatures. Tafel curve analysis indicated that the NiMo-coated electrodes exhibited superior catalytic activity compared to pure Ni electrodes. Literatures have emphasized the importance of 3D geometries structures of electrodes. However, it is widely acknowledged that a major limitation in numerous investigations is that investigations have been conducted with very small electrode geometries on a laboratory scale, and achieving repeatability, especially on surfaces prepared through galvanostatic methods or chemical deposition processes, not always feasible. Consequently, the production of 3D-printed electrodes holds significant importance. It is noteworthy that there is currently a dearth of research in the literature regarding the performance of materials produced using 3D printing technology with metal feedstock in the context of hydrogen gas production through electrolysis in an alkaline environment. In this study, we present Additive Manufacturing as a method of hydrogen production after thoroughly researching it to overcome the shortcomings indicated above. Nevertheless, this domain is of main significance, particularly in the manufacturing of materials in various geometries and alloy-component ratios. It exhibits considerable promise, especially in the context of producing components with specific dimensions and properties for industrial applications.

In present study, electrodes produced using the additive manufacturing method will pave the way to produce electrodes in any desired structure or shape instead of the conventional geometry and shape. In this way, it will open up ways to use hydrogen energy more efficiently. To make the work even more innovative, the honeycomb structure used in recent years has been adopted. The honeycomb- shaped 3D-printed electrode made of a steel alloy was used as the cathode for the alkaline electrolysis system. The behavior of the catalyst was compared with graphite and platinum electrodes using linear voltammetry, cyclic voltammetry

and chronoamperometry, and the hydrogen volume values generated were also compared. Tensile tests were carried out on the samples and compared.

In this study, the feasibility and effectiveness of cathodes produced via additive manufacturing for hydrogen production are explored, with a particular focus on the newly designed 3Dc honeycomb electrodes. The investigation aims to demonstrate that this process is not only viable in experimental settings but also applicable in industrial applications. Wind energy, harvested through vertical axis wind turbines utilizing different NACA airfoil types, was employed to drive hydrogen production. A detailed analysis of power generation at various wind speeds was conducted, and the results were integrated into both experimental and simulation models. By combining expertise from fields such as chemistry, electrical engineering, electronics, and mechanical engineering, this study provides a comprehensive evaluation of additive manufacturing's role in green hydrogen production. This pioneering work highlights the potential for additive manufacturing technologies, particularly with the 3Dc electrodes, to contribute significantly to sustainable energy solutions, especially in wind-powered hydrogen generation systems.

2. MATERIAL AND METHOD

2.1. Production of Cathode Electrodes and Characterization

3D printed metal production by Additive Manufacturing has advantages over traditional techniques in that it allows for detailed and complicated geometries while decreasing material waste and allowing for more efficient production, customization, and rapid prototyping. The production of electrodes was achieved via BLT A160 3D metal additive manufacturing machine and the electrode's surface area was 341.95 mm² in Figure 1.

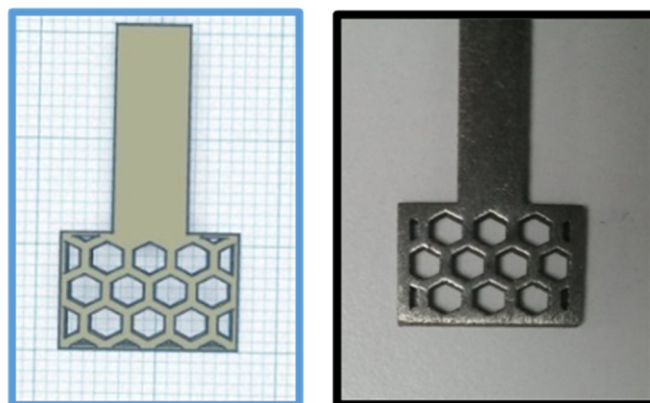


Figure 1. The 3Dc (3D metal cathode by Additive manufacturing)

It was denoted as 3Dc (3D manufactured metal cathode). The counter electrode in electrochemical experiments was built of a 1:1:0.01 cm platinum sheet. It also served as the second working electrode for comparison. As a reference electrode, a commercial Ag/AgCl (3 M KCl) was employed. A cylindrical graphite rod with a 0.5 cm diameter served as the third working electrode. The electrochemical tests were achieved in 1 M KOH by galvanostatically using CHI 660B A.C. electrochemical analyser at room temperature, open to atmosphere. The linear sweep voltammetry (LSV) study was carried out using a scan rate of 0.05 V s⁻¹. A scan rate of 0.1 V s⁻¹ was used for the cyclic voltammetry (CV) investigation. The durability test was performed via chronoamperometry analysis (CA) at -1.8 V. The FEI Quanta 650 Field Emission SEM with an EDX detector was used to get images at 20 keV. The hydrogen gas volume was determined by a two-electrode electrolysis cell which, the Pt was used as anode the working electrode was used as cathode. In the setup of this system, a burette was filled with 1M KOH, it was inverted to the cathode various constant potential values were applied to the system.

The uniaxial tensile experiments of selective 3D printed samples have been performed with a cross-head speed of 1 mm/min on a Shimadzu tensile test machine at room temperature. Each experiment repeated 3 times and the average values were reported as the response variables of the test samples as shown in Figure 2.

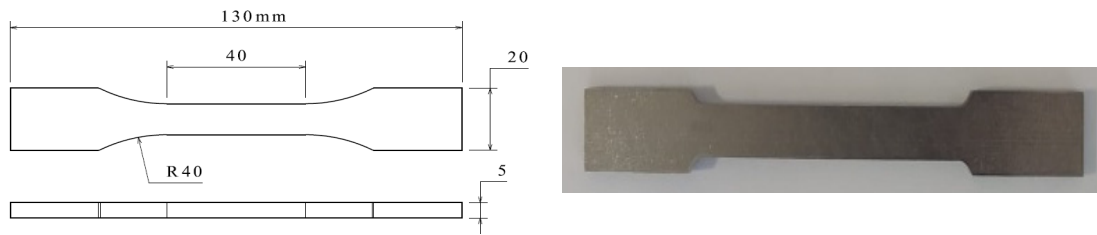


Figure 2. The 3D metal printed samples for tensile test

2.2. Modeling of a Wind Energy System

The electrolysis process plays an important role in the production of hydrogen by separating water into its components, and this process requires an energy-intensive process. Therefore, using sustainable and renewable energy sources offers great advantages both environmentally and economically. Wind turbines are an ideal option to meet this energy need [23–28]. In particular, using a wind turbine with the appropriate power for electrolysis minimizes the carbon footprint and reduces energy costs by integrating hydrogen production with clean energy. This approach increases the use of renewable energy, reduces fossil fuel dependency and contributes to a more sustainable future. In this study, an optimum wind turbine model is presented for the electrolysis process at different wind speeds.

It is well known that wind and solar energy are among the most studied areas in the literature. Numerous parameters have been examined in studies on these areas of renewable energy. In order to understand the study, the parameters used were as simple and comprehensible as possible. For this reason, simplicity has been prioritized in the simulation studies in the following sections. In this way, the researchers have the opportunity to show the effects of parameters that were not investigated. The wind turbines and hydrogen production through alkaline electrolysis play an important role in sustainable energy production in urban neighborhoods, reducing environmental impact, increasing energy security and facilitating the efficient use of clean energy sources [29–32]. For the wind turbine, the Q-Blade program was used to determine various key parameters that significantly influence the turbine's performance. The program facilitates the estimation of power output, tip speed ratio (TSR) and aerodynamic coefficients such as power coefficient (C_p) and lift coefficient (C_L). Power output is a key parameter that reflects the turbine's ability to convert wind energy into mechanical power. TSR, which is calculated as the ratio between the tangential speed of the blade tip and the wind speed, is crucial for optimizing the efficiency of the turbine. C_p , which represents the efficiency of energy generation, and C_L , the lift generated by the blade, are essential factors for evaluating aerodynamic performance.

The performance of turbines used to generate wind energy depends on the type of blades used. These blades have very different numbers and characteristics. For the study presented, a horizontal wind turbine and a suitable blade type studied in the literature were selected for lower energy production and usability. Large wind energy systems are usually installed in remote offshore locations because they require long transmission lines and extensive installation equipment. In contrast, small wind turbines offer advantages in reducing installation costs, especially for modest power generation. When comparing small vertical axis wind turbines (VAWTs) with small horizontal axis wind turbines (HAWTs), VERTs offer significant advantages. This is because HAWTs do not work well in urban areas, which are characterized by high turbulence and low wind speeds. The typically high tip speed ratio of HAWTs results in significant aerodynamic noise from the blades, and the rapid rotation can prevent birds from avoiding them. In contrast, vertical axis wind turbines (VAWTs) typically have a lower tip speed ratio, resulting in less aerodynamic noise. Consequently, VAWTs facilitate the feasibility of wind turbine installations in urban public facilities and residential areas [33–35]. In wind energy simulation studies, the simplest and most useful parameters possible were selected to determine the efficiency of the wind turbine. In wind turbines, the aerodynamic performance of blades is commonly characterized by using the lift coefficient (C_L) and drag coefficient (C_D). These coefficients elucidate how the blades interact with the airflow, delineating the generation of aerodynamic forces. C_L and C_D values are typically determined through methods such as laboratory tests or computer simulations, and they often exhibit variations for different wind speeds. These coefficients are pivotal parameters for optimizing blade design, ensuring the wind turbine operates with maximum efficiency.

Lift Coefficient (C_L) represents the lift force generated by the blades. In wind turbines, the blades exhibit a high-pressure side and a low-pressure side as the airflow passes over them. The C_L coefficient expresses the lift force resulting from this pressure difference. Drag Coefficient (C_D) characterizes the resistance force exerted by the blades. When the blades move against the airflow, C_D denotes the resistance force counteracted by the air. C_L and C_D are typically expressed by the following general formulas:

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

$$C_D = \frac{F_D}{0.5\rho V^2 A} \quad (2)$$

where F_L represents the lift force (in Newtons), F_D is the drag force (in Newtons), ρ denotes air density (in kilograms per cubic meter), v represents the airspeed (in meters per second). A refers to the wing or surface area (in square meters).

The determination of C_L and C_D values is crucial for advancing the understanding of aerodynamic behavior and optimizing the design of wind turbine blades for enhanced performance [36,37]. The rotor diameter of vertical wind turbines is determined based on various factors and typically varies according to design objectives and application conditions. The rotor diameter directly influences the turbine's ability to capture wind energy and, consequently, mechanical power production. Factors influencing rotor diameter determination include wind speed, power production goals, aerodynamic design, site constraints, cost considerations, and durability. Mechanical power is closely associated with the determined rotor diameter, wind speed, turbine aerodynamic characteristics, and other relevant factors. In this context, mechanical power is often expressed by the following formula:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p R \omega \quad (3)$$

where ρ represents the air density, A denotes the turbine blade area, V signifies the wind speed, C_p is the power coefficient, R represents the turbine rotor radius, and ω represents the angular velocity of the turbine. This formula serves as a fundamental mathematical expression for calculating the mechanical power of the turbine. Tip Speed Ratio (TSR) is a crucial parameter in wind turbine design. It represents the ratio between the speed of the tip of the wind turbine blade and the actual wind speed. Wind turbine designers and operators aim to adjust the TSR. A good TSR value depends on various factors, including the specific wind turbine design, site conditions, and the intended purpose of the turbine. TSR selection is crucial for maximizing energy production and ensuring the longevity of wind turbines. TSR is defined as:

$$TSR = \frac{\omega R}{V} \quad (4)$$

where ω is the angular velocity, R is the rotor radius, and V is the wind speed.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

Electrolysis requires electrical energy to separate water into hydrogen and oxygen gases, and it is of great importance to meet this energy need in a sustainable manner. Wind turbines, as a renewable energy source, can provide the electrical energy required for the electrolysis process. A wind turbine selected with the appropriate power provides the continuous and sufficient energy required for electrolysis, both increasing operational efficiency and reducing dependency on fossil fuels. In this way, hydrogen production that does not harm the environment and keeps the carbon footprint to a minimum becomes possible. In this study, the hydrogen gas value generated as a result of the electrolysis process will be determined by using the optimum wind turbine model for the electrolysis process. The system design is presented in Figure 3.

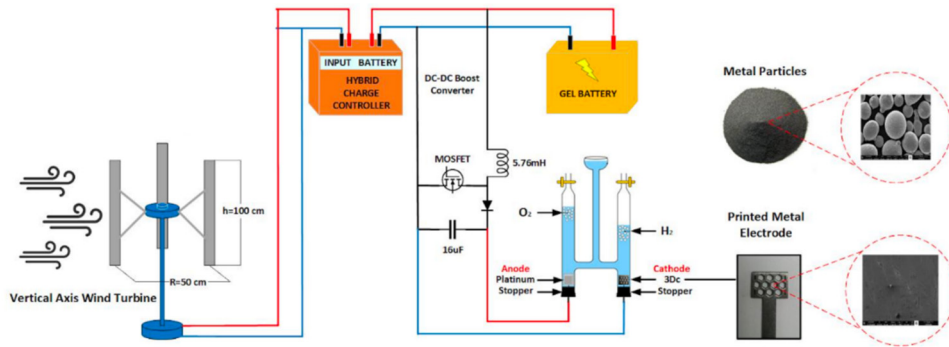


Figure 3. Proposed renewable energy-supported electrolysis system

Different wind turbine models are examined for the electrolysis process. The wind turbine model with optimum efficiency is determined for wind turbine models with varying types of blades. The hydrogen production potentials of wind turbine models with electrolysis are compared with different scenarios.

3.1. Wind Turbine Models

In order to improve performance of the wind turbine, a vertical axis wind turbine was designed using the Q-Blade program. In order to save cost, the number of blades was reduced on the prototype and the number of blades was selected as three. NACA 0012, NACA0015 and NACA 0018 blades, which are the most preferred blades in the literature, were used in the Q-Blade software to improve the design performance of the vertical axis wind turbine [38–41]. The study focused on power generated by the wind turbine through experimentation with different wind speed and rpm for three airfoil profiles. Figure 4 presents the performance analysis results conducted at different revolutions per minute values and wind speeds ranging from 3 m/s to 18 m/s using NACA 0012, 0015, and 0018 airfoils. These graphs help us understand how wind turbine performance varies with wind speed and rotation speed. Selecting a specific wind speed and rotation speed for optimum power generation can enhance the turbine's efficiency, extend its lifespan, and optimize energy production capacity.

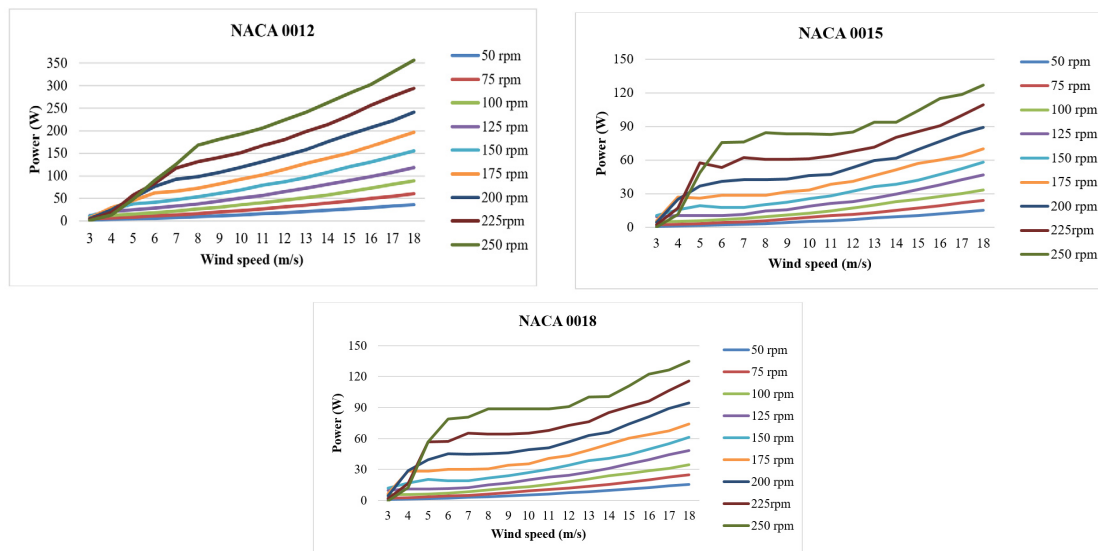


Figure 4. Electrical performance at different wind speeds (a) NACA 0012 (b) NACA 0015 (c) NACA0018

Until the wind speed reaches 8 m/s, there is a rapid increase in power production, while after 8 m/s, the increase in power production continues with a less steep slope in Figure 4a. At a wind speed of 18 m/s and a rotation speed of 250 rpm, the power production value reaches 356.9 watts. The steepest points in the power increase for NACA0015 and NACA0018 airfoils are observed at wind speeds of 4 m/s, 5 m/s and 6

m/s, after which it gradually levels off. As seen in Figure 4b and Figure 4c, the maximum power produced is 127.1 watts for NACA0015 and 135 watts for NACA0018, respectively.

The performance assessment of a vertical axis wind turbine, equipped with 3 blades, a rotor diameter of 50 cm, and blade lengths measuring 100 cm, involved experimentation with various airfoils to enhance its efficiency. The performance of a vertical axis wind turbine with three blades, each utilizing a different airfoil, was simulated. The results were presented in Figure 5 for comparative analysis.

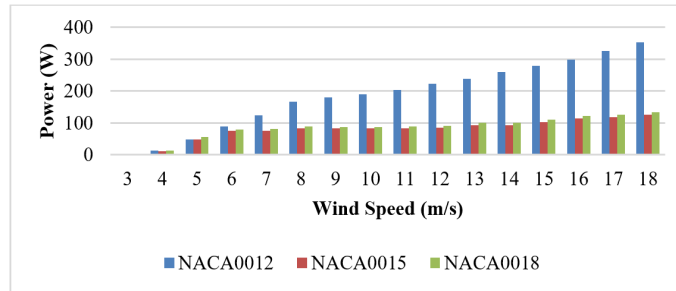


Figure 5. The comparison of power generation of wind turbine for airfoils

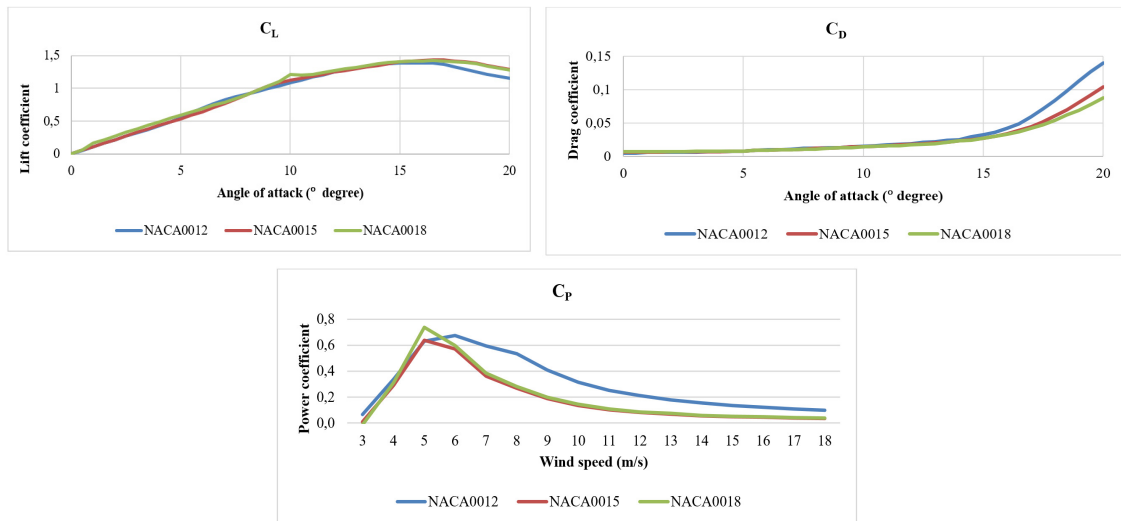


Figure 6. The lift coefficients (C_L) at angles of attack 0° and 20° (a), The drag coefficients (C_D) at angles of attack 0° and 20° (b), The Lift coefficients (C_p) from 3 m/s to 18 m/s wind speed (c)

Figure 6a and Figure 6b depict the C_L and C_D values for NACA0012, NACA0015, and NACA0018 profiles over a range of attack angles from 0° to 20° . As the angle of attack increases from 0° , C_L also increases. At a 15° angle of attack, the NACA12 profile reaches a C_L value of 1.38, indicating that the airfoils are approaching stall. As the angle of attack reaches 20° , C_L decreases to 1.15, signifying that the airfoils have entered the stall. At a 15° angle of attack, NACA0015 and NACA0018 profiles reach a C_L value of 1.4. When the angle of attack reaches 20° , C_L decreases to 1.29 for NACA0015 and 1.28 for NACA0018, respectively.

C_D values increase with the angle of attack as seen Figure 6b. At 20° , NACA0012, NACA0015, and NACA0018 airfoils have C_D values of 0.14, 0.104, and 0.088, respectively. NACA0015 and NACA0018 profiles have a shallower slope angle compared to NACA0012. This results in less lift generated by NACA0015 and NACA0018 profiles. However, the reduced lift also leads to lower drag forces. This enhances the efficiency of the NACA0015 and NACA0018 profiles.

The C_p value in wind turbine blades is the ratio of the power generated by the blades to the power obtained from the wind. Although the highest value is observed in the NACA0018 airfoil at a wind speed of 5 m/s, as the wind speed increases, it can be seen in Figure 6c that the C_p value is much better for NACA0012, and NACA0015 and NACA0018 have approximately the same values.

3.2. The Characterization of Electrodes

The morphological characteristics of metal particles pre and post the 3D printing process were scrutinized through Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) analysis, and their chemical compositions were ascertained via Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX). The corresponding findings were elucidated in Figures 7a and 7b. As depicted in Figure 7a, distinct particle structures were observed, with the particle size falling within the range of 20-50 μm . Furthermore, Figure 7a illustrated the EDX spectra, confirming the presence of Nickel (Ni), Chromium (Cr), Cobalt (Co), Molybdenum (Mo), Manganese (Mn), Aluminum (Al), and Iron (Fe) within the examined metal particles. Figure 7b revealed the presence of homogeneous surfaces. The chemical composition observed on the surface of the 3D-printed sample closely resembled that of the metal particle mixture, indicating a high degree of consistency. When the contents were examined in detail, it was seen that the electrodes produced were compatible with AISI 304 steel.

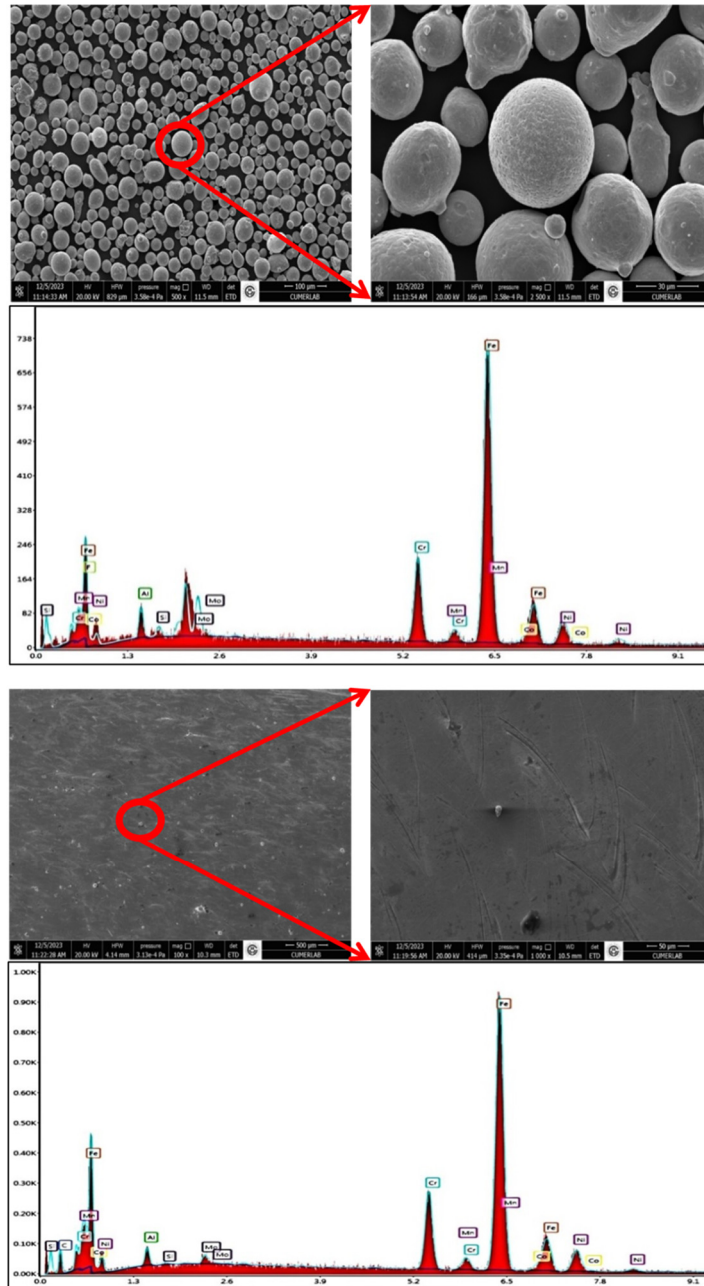


Figure 7. The FESEM – EDX measurements of metal particles (a), The FESEM – EDX measurements of 3Dc (b)

Moreover, comparison of the 3D-printed electrode with the properties of AISI 304 steel was substantiated through tensile tests. Three samples for tensile testing were prepared according to ASTM E 8M standards, and the experiments were conducted using a SHIMADZU tensile test machine. The graphical representation of the tensile test results was provided in Figure 8, the results were presented in Table 1. As seen from the analysis result, comparable material was produced via 3D printing method [42,43].

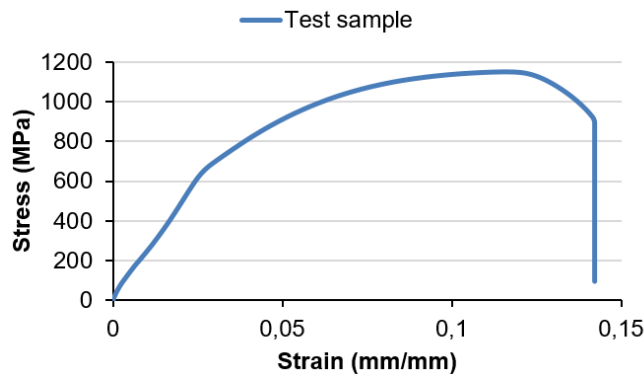


Figure 8. Tensile test result of sample

Table 1. Investigation and comparison of the properties of test pieces

	Tensile strength, ultimate (Mpa)	Tensile strength Yield (Mpa)	Elongation at break (%)	Modulus of elasticity (Gpa)	Shear modulus (Gpa)
AISI 304	505	215	70	193-200	86
AISI 305	580	230	45	200	77

3.3. Electrochemical Measurements

The outcomes of the linear sweep voltammetry analysis were depicted in Figures 10 and 11. Evaluation of the hydrogen production efficiency for the examined electrodes centered on their catalytic activity, as indicated by the onset potential and current density values within the cathodic region. Notably, the 3D-printed metal electrode exhibited remarkable effectiveness in comparison to both platinum (Pt) and graphite (G) electrodes among those investigated. This underlined the higher catalytic performance of the 3D-printed electrode than G and comparable with Pt, showcasing its potential as a highly efficient cathode in the context of hydrogen production. The synergistic effects observed in the combination of nickel, cobalt, iron, chromium, and copper showcase a synergistic enhancement of catalytic activity. The concerted action of these metals manifests in improved electronic and structural properties, creating a synergistic environment that elevates the catalytic efficiency for the Hydrogen Evolution Reaction (HER). Particularly, the inclusion of transition metals in the iron electrode induces modifications in its electronic structure, thereby establishing a more favorable energy landscape conducive to the HER. This structural adjustment enhances the adsorption and activation of hydrogen ions, thus facilitating and promoting the reaction. Furthermore, the incorporation of nickel and copper contributes to the generation of additional active sites on the electrode surface. These supplementary active sites play a crucial role in facilitating more hydrogen evolution reactions, so substantially augmenting the overall catalytic activity.

The stability of the electrode holds equal importance to its Hydrogen Evolution Reaction (HER) activity. The durability of the electrode during HER is a critical factor as it significantly influences the reliability and reproducibility of experimental outcomes. A durable electrode ensures stable and consistent performance over extended periods, minimizing the necessity for frequent electrode replacements.

The CA analysis results of all electrodes are presented in Figure 9. To assess the electrode's durability, chronoamperometry (CA) technique was employed, followed by immediate Linear Sweep Voltammetry (LSV) measurements presented in Figure 11, and Cyclic Voltammetry (CV) measurements illustrated in Figure 12. These sequential tests provide a comprehensive evaluation of the electrode's stability under prolonged HER conditions, contributing valuable insights into its long-term performance and reliability.

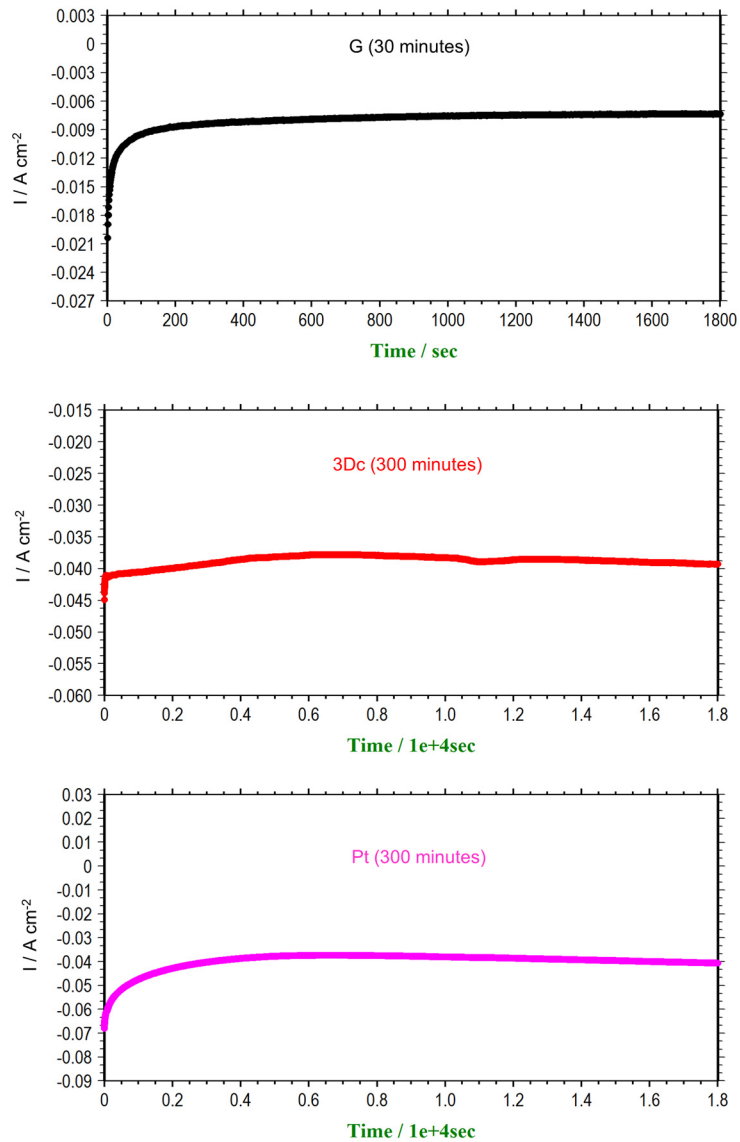


Figure 9. The CA analysis of all electrodes

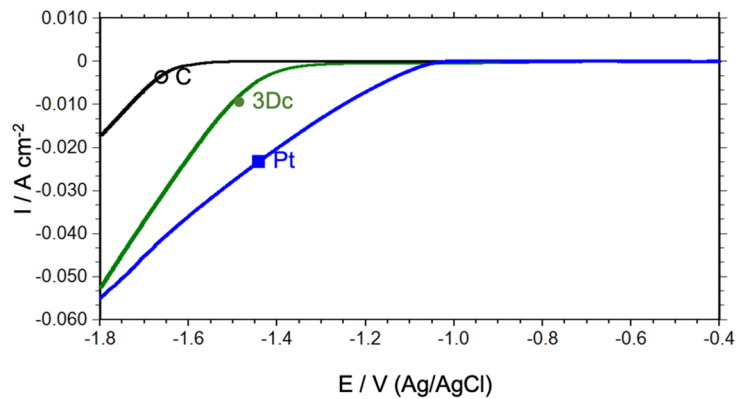


Figure 10. The linear sweep voltammograms of C (○), 3Dc (●) and Pt (■) in 1 M KOH solution with scan rate of 50 mV s^{-1}

As depicted in Figure 11, according to the results obtained from LSV analysis, it was observed that, following CA analysis (@-1.5V vs Ag/AgCl), G lost its stability, whereas both 3Dc and Pt electrodes maintained their stability.

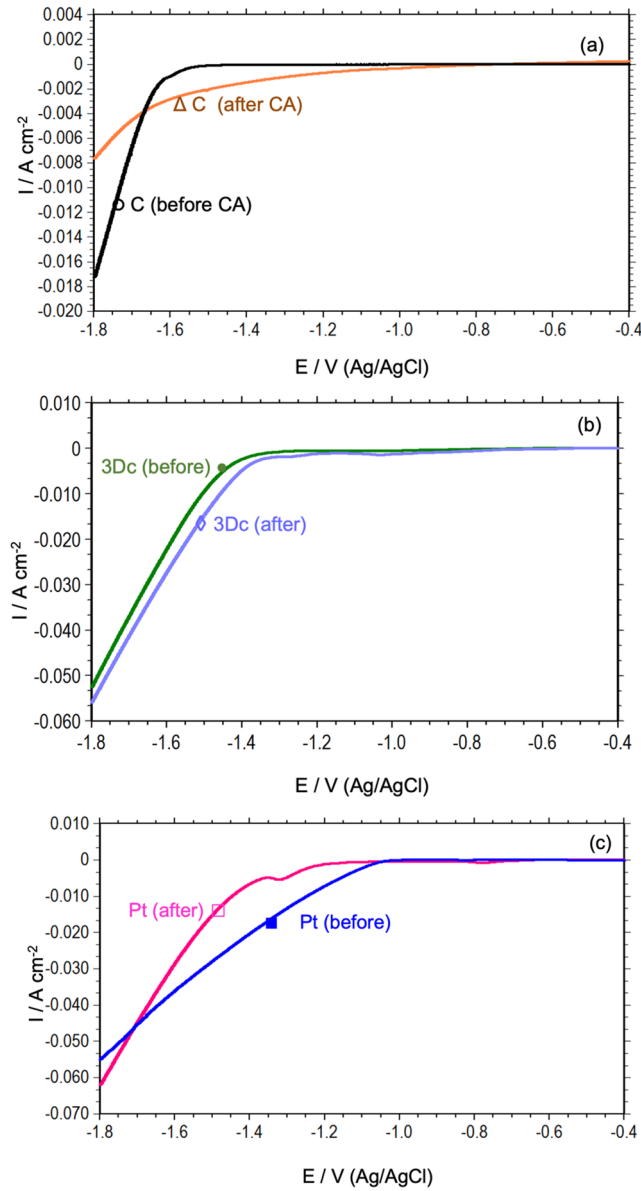


Figure 11. The linear sweep voltammograms of electrodes in 1 M KOH solution before and after CA

The 3Dc CV curves before and after CA was shown in Figure 12. After prolonged exposure to cathodic potential, an increase in oxidation current values was observed during subsequent anodic potential scans. This was an anticipated phenomenon in Figure 12.

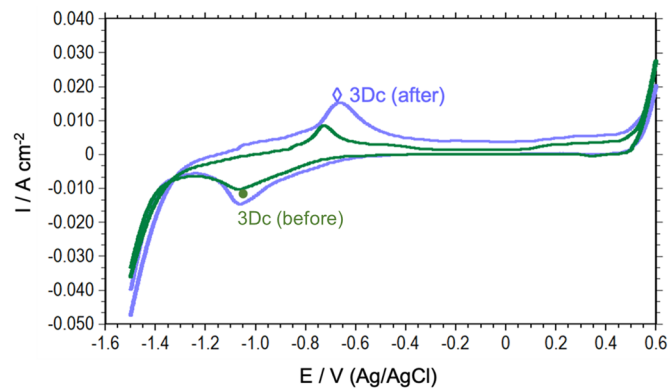


Figure 12. The cyclic voltammograms of 3Dc in 1 M KOH solution before and after CA

In Figure 12, the detection of the anodic peak at -0.6 V during forward scanning suggests Ni/Ni²⁺ oxidation, followed by the conversion of α-Ni(OH)₂ to β-Ni(OH)₂ between -0.4 and 0.4 V (versus Ag/AgCl). Ni²⁺/Ni³⁺ oxidation is observed around 0.5 V, but Ni³⁺/Ni²⁺ is identified as a cathodic peak in backward scan at approximately 0.35 V. During the reverse scan, the cathodic peaks were seen in the potential of -1.05 V, related to the reaction of transition metal oxides to reduced forms.

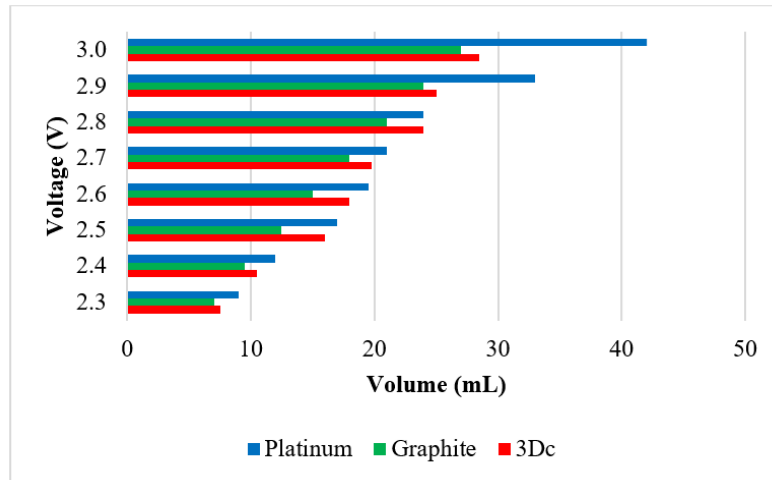


Figure 13. Comparison of hydrogen volumes of 3Dc, graphite and platinum electrodes at different voltages during 30 minutes

Figure 13 indicated the volumes of hydrogen produced during the electrolysis process. The production of hydrogen increased gradually with time for each catalyst, positively correlated with the longer electrolysis duration. More hydrogen gas was produced as the potential increased. A volume correction for water vapor was performed to the data collected every five minutes [44]. Additionally, the tests for 3Dc were repeated 3 times and the hydrogen volumes at different voltages for VH₂ of 3Dc @ 2.4; 2.7 and 3 V were 10.5; 19.75 and 28.5 mL, respectively for 30 minutes electrolysis period. The 3Dc demonstrated higher hydrogen gas efficiency. The literature comparison showed in Table 2. According to this study, the hydrogen production performance of 3Dc was comparable to that of the literature.

Table 2. The hydrogen gas volumes generated during alkaline electrolysis

Electrodes	Procedures	V H ₂ (mL)	Ref.
High Carbon Steel	After 30 minutes of electrolysis at a constant potential of 4V	35.3	[45]
CF/NiGa	After 30 minutes of electrolysis at a constant potential of 3V	28.9	[46]
C/Ni	After 30 minutes of electrolysis at a constant potential of 3V	27.7	[47]
C/NiCoW	After 30 minutes of electrolysis at a constant potential of 3V	30.6	[47]
C/NiCoIr	After 30 minutes of electrolysis at a constant potential of 3V	29.7	[47]
Zn ₉₅ Fe ₅	After 30 minutes of electrolysis at a constant potential of 5V (0.2 A)	27	[48]
3Dc	After 30 minutes of electrolysis at a constant potential of 3V	28.5	In this study

3.4. Hydrogen Production Potentials

The analysis of hydrogen production (in liters) from the vertical wind turbine at different wind speeds and NACA airfoil types (NACA12, NACA15, NACA18) demonstrates key differences in performance in Table 3.

Table 3. Hydrogen production volumes using the 3Dc electrode in 30 minutes at different wind speeds

Wind speed (m/s)	NACA12 H ₂ /liter	NACA15 H ₂ /liter	NACA18 H ₂ /liter
4	0.73350333	0.62859276	0.67811402
5	2.6700771	2.69879716	3.12643055
6	4.93106704	4.18507954	4.36531795
7	6.91666556	4.2151904	4.45993818
8	9.28573644	4.67356456	4.9028493
9	10.0332071	4.6237322	4.89097944
10	10.6324492	4.61015067	4.89155564
11	11.3945096	4.59721116	4.89676259
12	12.3918196	4.70799262	5.02394519
13	13.3017033	5.19109299	5.54816692
14	14.4846031	5.19298489	5.55387145
15	15.6041429	5.75939121	6.12762853
16	16.7082088	6.36504918	6.75359303
17	18.2129725	6.56782388	6.98919024
18	19.7236072	7.02247209	7.45757097

At low wind speeds (4-6 m/s), the hydrogen production for all three airfoil types is moderate but shows discernible trends. NACA12 produces the highest amount of hydrogen (0.73 liters at 4 m/s), followed closely by NACA18 (0.68 liters), while NACA15 produces the least (0.63 liters). However, at 6 m/s, NACA18 takes the lead with 3.12 liters of hydrogen, surpassing both NACA12 and NACA15. This shift indicates that NACA18 begins to outperform the others as the wind speed increases slightly.

In the mid-range wind speeds (7-10 m/s), NACA12 demonstrates superior performance, generating the most hydrogen consistently across these wind speeds. For example, at 9 m/s, NACA12 produces 10.03 liters of hydrogen, while NACA18 produces 4.89 liters, and NACA15 slightly lags behind. This showcases the efficiency of NACA12 in converting wind energy into hydrogen production more effectively than the other airfoils at these wind speeds.

At higher wind speeds (11-18 m/s), NACA12 continues to dominate in hydrogen production, reaching 19.72 liters at 18 m/s. NACA18 shows strong potential, improving significantly as wind speeds rise, with 7.45 liters of hydrogen produced at 18 m/s. NACA15, while still lower than the other two, begins to show steady growth, producing 7.02 liters at 18 m/s, indicating that it performs better as wind speeds reach their upper range.

Across all wind speeds, NACA12 stands out as the most efficient airfoil for hydrogen production, showing consistent dominance from low to high wind speeds. NACA18 shows a strong ability to catch up at higher wind speeds, indicating it may be better suited for conditions where wind speeds are consistently higher. NACA15, while performing lower across most wind speeds, displays stable increases in hydrogen production as wind speeds increase, indicating that it might be better suited for environments with higher and steadier wind conditions.

4. CONCLUSIONS

In this study, a detailed study was carried out for the electrode produced by the 3D additive manufacturing method in hydrogen production. For hydrogen production, different wind turbines were examined. The chemical and mechanical properties of the produced 3D metal printed electrode were investigated and the test results proved its compatibility with AISI 304 steel. The 3D-printed metal electrode outperformed the typical graphite electrode in terms of catalytic efficiency; it lagged behind the platinum electrode, but the results were comparable especially according to price. The VH₂ of 3Dc @ 2.4; 2.7 and 3 V were 10.5; 19.75 and 28.5 mL, respectively for 30 30-minute electrolysis period. The 3Dc demonstrated higher hydrogen gas efficiency. The results indicated that 3Dc has the potential to be an efficient cathode for

hydrogen production. The synergistic effects observed from the combination of transition metals contributed to increased catalytic activity, while the electrode's stability, as assessed by chronoamperometry and cyclic voltammetry tests, emphasized its reliability and long-term performance in the hydrogen evolution reaction. These findings illustrated the potential benefits of using such unique electrode designs in sustainable hydrogen production systems. Also, the evaluation of hydrogen production in liters from a vertical wind turbine, considering various wind speeds and different NACA airfoil types, highlights significant differences in performance. In the future, we aim to modify the metal powder by green chemistry methods and the 3D metal printing technology by changing all additive manufacturing parameters that will apply to the production of electrodes.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to acknowledge the Gokhan PARSAK and PETKA MOLD IND. AND TRADE Inc. for additive manufacturing process.

6. REFERENCES

1. Al-Orabi, A.M., Osman, M.G. & Sedhom, B.E. (2023). Analysis of the economic and technological viability of producing green hydrogen with renewable energy sources in a variety of climates to reduce CO₂ emissions: A case study in Egypt. *Applied Energy*, 338, 120958.
2. Liu, J., Zhou, Y., Yang, H. & Wu, H. (2022). Net-zero energy management and optimization of commercial building sectors with hybrid renewable energy systems integrated with energy storage of pumped hydro and hydrogen taxis. *Applied Energy*, 321, 119312.
3. Hurtubia, B. & Sauma, E. (2021). Economic and environmental analysis of hydrogen production when complementing renewable energy generation with grid electricity. *Applied Energy*, 304, 117739.
4. Qiu, R., Zhang, H., Wang, G., Liang, Y. & Yan, J. (2023). Green hydrogen-based energy storage service via power-to-gas technologies integrated with multi-energy microgrid. *Applied Energy*, 350, 121716.
5. Williams, L. & Wang, Y. (2024). A distributed renewable power system with hydrogen generation and storage for an island. *Applied Energy*, 358, 122500.
6. Dwivedi, S., Dixit, A.R., Das, A.K. & Nag, A. (2023). A novel additive texturing of stainless steel 316L through binder jetting additive manufacturing. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 10(6), 1605-1613.
7. Lee, J., Kim, H.-C., Choi, J.-W. & Lee, I. H. (2017). A review on 3D printed smart devices for 4D printing. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 4(3), 373-383.
8. Hossain, M.J., Tabatabaei, B.T., Kiki, M. & Choi, J.-W. (2024). Additive manufacturing of sensors: a comprehensive review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*.
9. Ko, H., Moon, S.K. & Hwang, J. (2015). Design for additive manufacturing in customized products. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 16(11), 2369-2375.
10. Ahn, D.-G. (2016). Direct metal additive manufacturing processes and their sustainable applications for green technology: A review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 3(4), 381-395.
11. Chua, Z.Y., Ahn, I.H. & Moon, S.K. (2017). Process monitoring and inspection systems in metal additive manufacturing: Status and applications. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 4(2), 235-245.
12. Kahhal, P., Jo, Y.-K. & Park, S.-H. (2023). Recent progress in remanufacturing technologies using metal additive manufacturing processes and surface treatment. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*.
13. Rosenthal, S., Hahn, M., Tekkaya, A.E., Platt, S., Kleszczynski, S. & Witt, G. (2022). Speeding up additive manufacturing by means of forming for sheet components with core structures. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 9(4), 1021-1034.
14. Chu, T., Park, S. & Fu, K. (Kelvin). (2021). 3D printing-enabled advanced electrode architecture design. *Carbon Energy*, 3, 424-439.
15. Park, S., Jin, H. & Yun, Y.S. (2020). Advances in the design of 3D-structured electrode materials for lithium-metal anodes. *Advanced Materials*, 32, 2002193.

16. Chabi, S., Peng, C., Hu, D. & Zhu, Y. (2014). Ideal three-dimensional electrode structures for electrochemical energy storage. *Advanced Materials*, 26, 2440-2445.
17. Arenas, L.F., Ponce De León, C. & Walsh, F.C. (2019). Three-dimensional porous metal electrodes: Fabrication, characterisation and use. *Current Opinion in Electrochemistry*, 16, 1-9.
18. Stojić, D. Lj., Marčeta, M.P., Sovilj, S.P. & Miljanić, Š. S. (2003). Hydrogen generation from water electrolysis-possibilities of energy saving. *Journal of Power Sources*, 118, 315-319.
19. Rodríguez, J. & Amores, E. (2020). CFD modeling and experimental validation of an alkaline water electrolysis cell for hydrogen production. *Processes*, 8, 1634.
20. Fatouh, M., Shedid, M.H. & Elshokary, S. (2013). Effect of operating and geometric parameters on hydrogen production from an alkali electrolyzer. *International Journal on Power Engineering and Energy*.
21. Gillespie, M.I. & Kriek, R.J. (2017). Hydrogen production from a rectangular horizontal filter press divergent electrode-flow-through (DEFT™) alkaline electrolysis stack. *Journal of Power Sources*, 372, 252-259.
22. González-Buch, C., Herraiz-Cardona, I., Ortega, E., García-Antón, J. & Pérez-Herranz, V. (2016). Study of the catalytic activity of 3D macroporous Ni and NiMo cathodes for hydrogen production by alkaline water electrolysis. *Journal of Applied Electrochemistry*, 46, 791-803.
23. Lim, C.W. (2017). Design and manufacture of small-scale wind turbine simulator to emulate torque response of MW wind turbine. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 4(4), 409-418.
24. Sung, C.-M. & Han, M.-C. (2016). Design and performance evaluation of hinge type pitch control system in small-size wind turbine. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 3(4), 335-341.
25. Kim, S.-H. & Suh, K. (2020). Experimental and numerical investigation on power characteristics of 300 W class horizontal axis wind turbine with wave winding type AFPM generator. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 7(4), 837-848.
26. Chen, Y.-J., Huang, G.-Y., Shiah, Y.C. & Tsai, Y.-L. (2020). Performance prediction for small horizontal axis wind turbine (HAWT) by integrated theory and experimental verifications. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 7(1), 131-140.
27. Hang, W.X., Tong, C.W., Hoe, W.K., Chin-Tsan, W., Huat, S.L., Chew, P.S. & Hin, L.S. (2018). Preliminary assessment of optimized accessorial roof shape for performance of wind turbine mounted on eco-roof system. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 5(3), 375-385.
28. Park, S., Han, G.D., Koo, J., Choi, H.J. & Shim, J.H. (2019). Profitable production of stable electrical power using wind-battery hybrid power systems: a case study from Mt. Taegi, South Korea. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 6(5), 919-930.
29. Chi, J. & Yu, H. (2018). Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production. *Chinese Journal of Catalysis*, 39, 390-394.
30. Ibáñez-Rioja, A., Järvinen, L., Puranen, P., Kosonen, A., Ruuskanen, V., Hynynen, K., et al. (2023). Off-grid solar PV-wind power-battery-water electrolyzer plant: Simultaneous optimization of component capacities and system control. *Applied Energy*, 345, 121277.
31. Kovač, A., Marčič, D. & Budin, L. (2019). Solar hydrogen production via alkaline water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 9841-9848.
32. Hassan, Q., Sameen, A.Z., Salman, H.M. & Jaszczur, M. (2023). Large-scale green hydrogen production via alkaline water electrolysis using solar and wind energy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48, 34299-34315.
33. Belmili, H., Cheikh, R., Smail, T., Seddaoui, N. & Biara, R.W. (2017). Study, design and manufacturing of hybrid vertical axis Savonius wind turbine for urban architecture. *Energy Procedia*, 136, 330-335.
34. Shyu, L.S., Lee, C.H., Hsiao, Y.C., Shih, T.M., Chang, C.C. & Wang, D.Y. (2012). High-efficiency 4kW VAWT design and development. *Advanced Materials Research*, 512-515, 617-622.
35. Loganathan, B., Chowdhury, H., Mustary, I., Rana, M.M. & Alam, F. (2019). Design of a micro wind turbine and its economic feasibility study for residential power generation in built-up areas. *Energy Procedia*, 160, 812-819.
36. Alaskari, M., Abdullah, O. & Majeed, M.H. (2019). Analysis of wind turbine using QBlade software. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 518, 032020.

37. Bak, C. (2007). Sensitivity of key parameters in aerodynamic wind turbine rotor design on power and energy performance. *Journal of Physics: Conference Series*, 75, 012008.
38. Gupta, A., Abderrahmane, H. A. & Janajreh, I. (2024). Flow analysis and sensitivity study of vertical-axis wind turbine under variable pitching. *Applied Energy*, 358, 122648.
39. Jang, H., Hwang, Y., Paek, I. & Lim, S. (2021). Performance evaluation and validation of H-darrieus small vertical axis wind turbine. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 8(6), 1687-1697.
40. Rezaeiha, A., Kalkman, I. & Blocken, B. (2017). Effect of pitch angle on power performance and aerodynamics of a vertical axis wind turbine. *Applied Energy*, 197, 132-150.
41. Saeidi, D., Sedaghat, A., Alamdari, P. & Alemrajabi, A.A. (2013). Aerodynamic design and economical evaluation of site specific small vertical axis wind turbines. *Applied Energy*, 101, 765-775.
42. Seyedzavvar, M. & Boža, C. (2023). A study on the effects of internal architecture on the mechanical properties and mixed-mode fracture behavior of 3D printed CaCO₃/ABS nanocomposite samples. *Rapid Prototyping Journal*, 29, 185-206.
43. Seyedzavvar, M. & Boža, C. (2022). Investigation on the effects of printing pattern on the load carrying capacity of 3D printed U-notched samples. *Meccanica*, 57, 1575-1590.
44. Güllü, E., Doğru Mert, B., Nazligul, H., Demirdelen, T. & Gurdal, Y. (2022). Experimental and theoretical study: Design and implementation of a floating photovoltaic system for hydrogen production. *International Journal of Energy Research*, 46, 5083-5098.
45. Kaya, M.F., Demir, N., Albawabiji, M.S. & Taş, M. (2017). Investigation of alkaline water electrolysis performance for different cost effective electrodes under magnetic field. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 17583-17592.
46. Koca, M.B., Gümüşgöz Çelik, G., Kardaş, G. & Yazıcı, B. (2019). NiGa modified carbon-felt cathode for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 14157-14163.
47. Sawadogo Adam, Y., Telli, E., Farsak, M. & Kardaş, G. (2023). Hydrogen production activity of nickel deposited graphite electrodes doped with CoW and CoIr nanoparticles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48, 31844-31854.
48. Chakik, F.E., Kaddami, M. & Mikou, M. (2017). Effect of operating parameters on hydrogen production by electrolysis of water. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 25550-25557.

Küresel İklim Değişikliği ve İklim Göstergelerindeki Tarihsel Eğilimler

Muhammet TOKMAKÇI^{1,a}, Mehmet BİLGİLİ^{1,b}, Engin PINAR^{1,c}

¹Çukurova Üniversitesi, Ceyhan Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Adana

^aORCID: 0009-0009-9724-0249; ^bORCID: 0000-0002-5339-6120; ^cORCID: 0000-0002-7484-8616

Makale Bilgileri

Geliş : 12.02.2025

Kabul : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665929

Sorumlu Yazar

Muhammet TOKMAKÇI

mtokmakci@cu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

İklim değişikliği

Küresel ısınma

Atmosferik yoğunluk

Sera gazı emisyonları

Atfşekli: TOKMAKÇI, M., BİLGİLİ, M., PINAR, E., (2025). Küresel İklim Değişikliği ve İklim Göstergelerindeki Tarihsel Eğilimler. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(1), 127-140.

ÖZ

İklim değişikliğinin temel nedeni, atmosferin fiziksel özelliklerini değiştiren ve iklimsel bozulmalara yol açan sera gazı emisyonlarının artmasıdır. Küresel ortalama sıcaklıkların artması, çığ noktası sıcaklıklarının yükselmesine ve bağıl nemin azalmasına neden olmuştur. Bu çalışmada, 1970-2023 yılları arasında küresel iklim göstergelerindeki değişimler ayrıntılı olarak incelenmiş ve kuru termometre sıcaklığı (T_k), çığ noktası sıcaklığı (T_d), çığ noktası depresyonu (DPD), özgül nem (w), bağıl nem (RH) ve yoğunluk (ρ) gibi kritik parametrelerdeki eğilimler analiz edilmiştir. Bulgular, iklim değişikliğinin hızla ilerlediğini, kuraklık ve şiddetli hava olaylarının olasılığını artırdığını gösteriyor. Ek olarak, gelecekteki çevresel ve sosyo-ekonomik uyum stratejileriyle ilgili acil eylem gerekliliği vurgulanmıştır. Bu çalışmada, küresel iklim değişikliğinin etkilerinin daha iyi anlaşılmasını ve uzun vadeli veriler ve iklim modellerine dayalı uygun politikaların geliştirilmesini amaçlamaktadır.

Global Climate Change and Historical Trends in Climate Indicators

Article Info

Received : 14.02.2025

Accepted : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665929

Corresponding Author

Muhammet TOKMAKÇI

mtokmakci@cu.edu.tr

Keywords

Climate change

Global warming

Atmospheric density

Greenhouse gas emissions

How to cite: TOKMAKÇI, M., BİLGİLİ, M., PINAR, E., (2025). Global Climate Change and Historical Trends in Climate Indicators. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(1), 127-140.

ABSTRACT

The main cause of climate change is an increase in greenhouse gas emissions, which alters the physical characteristics of the atmosphere and causes climatic perturbations. Rising global mean temperatures have resulted in elevated dew point temperatures and diminished relative humidity. This study thoroughly examines the alterations in global climatic indicators from 1970 to 2023, analyzing trends in critical parameters like air dry bulb temperature (T_k), dew point temperature (T_d), dew point depression (DPD), absolute humidity (w), relative humidity (RH), and density (ρ). The findings indicate that climate change is progressing rapidly, heightening the likelihood of drought and severe weather occurrences. In addition, the necessity for immediate action regarding future environmental and socio-economic adaptation strategies was underscored. In this study aims to enhance understanding of the impacts of global climate change and to develop suitable policies grounded in long-term data and climate models.

1. GİRİŞ

İklim; atmosfer, karasal yüzeyler, kar ve buz, denizler ve diğer deniz yapıları ile mikrobiyolojik organizmaları içeren çok yönlü, etkileşimli bir sistemdir. Bu sistem, iç dinamiklerinin etkisi altında ve dış faktörlerdeki değişikliklere bağlı olarak zamanla yavaşça değişir. Güneş kaynaklı değişimler ve volkanik patlamalar gibi doğal olayların yanı sıra insan faaliyetlerinden kaynaklanan atmosferin bileşimindeki değişiklikleri de kapsayan iklim değişikliği, günümüzde dünyanın karşı karşıya olduğu en önemli sorunlardan biridir. İnsan yaşamının tüm yönlerini olumsuz etkileyen karmaşık bir sorundur.[1]. İklim değişikliğinin, insan faaliyetleri sonucu atmosfere salınan sera gazları nedeniyle hızla arttığı bilinmektedir. Fosil ve biyokütle yakıtlarının yakılması, insan kaynaklı sera gazı emisyonlarının en büyük kaynağı olarak ifade edilmektedir. İnsan faaliyetleri, arazi kullanımındaki değişiklikler, ormansızlaşma ve endüstriyel faaliyetler yoluyla atmosfere yayılan sera gazlarının hızla birikmesinin, doğal sera etkisini artırdığı düşünülmektedir. Dünya'dan yansıyan uzun dalga boylu ışınlar bulutlar ve su buharı (H₂O), karbondioksit (CO₂), metan (CH₄), Dinitrojen monoksit (N₂O) ve ozon (O₃) gibi sera gazları tarafından emilir ve bunlar atmosferdeki sera etkisini düzenler. Sera etkisi, dünya ısı dengesi için gerekli bir mekanizmadır [2]. Öte yandan, insan faaliyeti sonucu atmosferde bulunan gazların varlığı gezegenin beklenenden daha yüksek bir oranda ısınmasına yol açmaktadır. Özellikle, sera gazı emisyonlarındaki artış, Sanayi Devrimi'nin başlangıcına denk gelen 1750'lerden bu yana belirgin bir artış göstermiştir. Atmosferdeki karbondioksit (CO₂) konsantrasyonu 2022 yılında milyonda 417.1 ppm'ye ulaştı ve bu, sanayi öncesi döneme kıyasla %50 lik artış bir artışı temsil ediyor Metan (CH₄) konsantrasyonu, sanayi öncesi seviyelere göre %165'lik bir artışı yansıtarak 1911.9 milyarda bir (ppb)'ye yükselmiştir. Dinitrojen monoksit (N₂O) konsantrasyonu, yoğun tarım uygulamalarına atfedilebilecek şekilde %24 artarak 335,7 ppb'ye yükseldi [3].

İklim değişikliği, 20. yüzyılın, özellikle son çeyreğinde en çok konuşulan ve tartışılan çevresel sorunlardan biri olmuştur. İklim değişikliğinin önlenabilir olması, dünyamız üzerindeki etkileri ve bu etkilere karşı alınabilecek önlemlerin politik yönleri nedeniyle bu konu Birleşmiş Milletler (BM) liderliğinde dünya ülkelerinin gündemine taşınmıştır. Bu amaçla, 1988 yılında, Birleşmiş Milletler' in iki kuruluşu olan Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) ve Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) aracılığıyla, insan faaliyetlerinin neden olduğu iklim değişikliği risklerini değerlendirmek amacıyla Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) kurulmuştur. Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC), 1990, 1995, 2001, 2007 ve 2013 yıllarında çalışmalarını kamuoyuna duyuran raporlar hazırlamıştır. Bu çalışmalarda bilimsel temeller, adaptasyon çalışmaları ve önleyici araştırmalar gibi bir dizi konu derinlemesine ele alınmıştır. Küresel ısınma ve iklim değişikliği olayları bilim insanları tarafından neden-sonuç ilişkisi bağlamında analiz edilmiştir. Bu değerlendirmenin sonucunda hükümetler, insan faaliyetlerinin neden olduğu zararları azaltmak için mümkün olan en büyük çabayı gösterme konusunda bir anlaşmaya varmışlardır. İklim değişikliğinin doğrudan ve dolaylı sonuçlarına maruz kalacak ülkelerin önemli araştırmalar yürütmesini gerektiren bu durum, daha sorumlu davranmayı ve bazı önlemler almayı zorunlu kılmaktadır. Bugün, iklim değişikliğinin tartışıldığı ve ulusal ve uluslararası düzeyde alınan önlemlerin, uyum ve önleme çabalarının tüm paydaşlar ve hükümetler tarafından yakından takip edildiği bir dönemde, en önemli konu, bir değişimin olup olmadığının ve varsa bu değişimin ne ölçüde olduğunun belirlenmesi ve izlenmesidir. İklim değişikliğine başarılı bir şekilde uyum sağlamak ve onu önlemek için doğru bir iklim izleme modelinin geliştirilmesi ve kullanılması kritik öneme sahiptir [4].

Mevcut literatür, özellikle karbondioksit (CO₂), metan (CH₄) ve Dinitrojen monoksit (N₂O) gibi sera gazlarının atmosferdeki birikiminin küresel ısınmaya doğrudan katkı sağladığını ortaya koymaktadır [5]. Faquese ve ark. [6] 1990 ile 2020 yılları arasında Lombardiya'da yıllık ortalama sıcaklıkta 0.0436°C'lik bir artış kaydederken, kar suyu eşdeğeri değişikliklerini de gözlemlemişlerdir. Kış aylarında azalma, bahar aylarında ise artış gözlemlenmiştir. Bu bulgular, bölgesel iklim değişikliği etkilerini göstermektedir. Kliengchuay ve ark. [7] ise 2001 ile 2020 yılları arasında Tayland'ın altı bölgesinde sıcaklık, bağıl nem ve yağışta artan eğilimler bulmuş ve güney ile doğu bölgelerinin özellikle bağıl nem ve ısı indeksi konusunda belirgin artışlar yaşadığını tespit etmiştir. Hansen ve ark. [8] çalışması, küresel yüzey sıcaklıklarının 1970'lerden itibaren hızla artış gösterdiğini ve bu artışın Arktik bölgelerde dünya ortalamasının iki katı hızla gerçekleştiğini belirtmektedir. Bu durum, iklim değişikliğinin farklı coğrafi bölgelerde farklı hızlarda meydana geldiğini göstermektedir. Held ve diğerleri [9], yüksek sıcaklıkların atmosferdeki su buharında artışa yol açtığını ve böylece hidrolojik döngüyü büyük ölçüde değiştirdiğini keşfetti. Dessler ve ark. [10] tarafından yapılan araştırma, su buharının önemli bir sera gazı olduğunu ve atmosferdeki konsantrasyonunun artmasının küresel ısınmayı daha da kötüleştirebileceğini göstermektedir. Küresel

ısınmanın, atmosferdeki su buharı birikiminin artması nedeniyle daha şiddetli yağışlara ve ani hava olaylarına yol açması beklenmektedir [11]. Çiğ noktası sıcaklıklarındaki artış, atmosferik nem tutma kapasitesindeki bir artışla ilişkilidir. Bu artış, meteorolojik koşullardaki değişikliklerle birlikte, atmosferde ek su buharının birikmesine neden olur. Literatürde, yüksek çiğ noktası sıcaklıkları yağış olasılığını artıran ve atmosferik yoğunlaşmayı hızlandıran bir faktör olarak kabul edilir. Gözlemlenen bağıl nemdeki azalmalar, artan sıcaklıkların buharlaşmayı artırarak atmosferik nem dengesini olumsuz etkilediğini göstermektedir [12]. Son araştırmalar, iklim değişikliği nedeniyle çiğ noktası depresyonu ve bağıl nem anomalilerinde artan bir eğilim olduğunu göstermektedir [13]. Atmosferdeki bağıl nem oranının azalması kurak hava koşullarına neden olurken, sıcaklık-nem dengesindeki bozulmalar su kaynaklarını ve ekosistemleri olumsuz etkiliyor. 2023 yılına ait çiğ noktası ve sıcaklık verileri, iklim değişikliğinin etkilerinin yoğunlaştığını ve atmosfer dengesinin bozulduğunu göstermektedir [14].

2. ÇALIŞMANIN YENİLİĞİ VE ÖNEMİ

Bu çalışmada, 1970-2023 yılları arasında küresel iklim göstergelerinde meydana gelen değişimler ayrıntılı olarak incelenmiş ve kuru termometre sıcaklığı, çiğ noktası sıcaklığı, çiğ noktası depresyonu, özgül nem, bağıl nem ve yoğunluk gibi temel parametrelerdeki eğilimler değerlendirilmiştir. Küresel alanda, uzun dönemli iklim verilerinin kapsamlı bir şekilde analiz edildiği çalışmalar sınırlıdır. Bu bağlamda, bu çalışma, çeşitli modellerin uygulanması yoluyla iklim verisi eğilimlerini inceleyerek bu boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır. Uzun dönemli veri setlerinden faydalanarak, araştırma iklim eğilimleriyle ilişkilendirilen kritik parametreleri vurgulayan grafikler sunmakta ve bu olguların daha derinlemesine anlaşılmasını sağlamaktadır. Elde edilen bulgular, iklim değişikliğine uyum sağlama ve sera gazı emisyonlarını azaltma stratejilerinin geliştirilmesinin önemini ortaya koymaktadır. Ayrıca, bu çalışma, gelecekteki araştırmaların uzun dönemli veri izleme ve değerlendirmeye odaklanması gerektiğini vurgulamaktadır. Çalışmanın yeniliği ve önemi aşağıda özetlenmiştir:

- Küresel iklim göstergelerine yönelik kapsamlı bir analiz sunarak, yerel eğilimler ve bu eğilimlerin gelecekteki iklim senaryoları üzerindeki etkileri hakkında önemli bilgilerin incelenmesi.
- Küresel iklim göstergelerinin son yıllarda nasıl evrildiğini ve bu değişimlerin tarım, su kaynakları ve halk sağlığı gibi sektörler üzerindeki olası etkilerini anlamaya katkıda bulunmak.

İklim değişikliği etkilerini hafifletmeye yönelik gelecekteki iklim politikaları ve stratejileri için uzun vadeli veri toplamanın ve izlemenin temel bir yaklaşım olarak gerekliliğini vurgulamak.

3. YÖNTEM

Bu çalışmanın metodolojisi, atmosferik verileri incelemek ve iklim değişikliği eğilimlerini saptamak üzerine oluşturulmuştur. Kullanılan yaklaşımlar meteorolojik parametrelerin hassas bir şekilde hesaplanmasını ve çeşitli göstergeler arasındaki korelasyonların analizini sağlamaktadır. Uzun vadeli iklim eğilimlerini değerlendirmek için aylık ve yıllık veriler üzerinde istatistiksel çalışmalar yürütülmüştür. Bu bölümde, iklim göstergelerini hesaplamak için kullanılan algoritmaların ve veri işleme yöntemlerinin ayrıntılı bir sunumu verilmiştir. Sıcaklık, genellikle hava sıcaklığı olarak bilinir, havanın en sık kullanılan özelliğidir. Bu terim, ortam havasının sıcaklığını belirtir. Çiğ noktası sıcaklığı, T_d atmosferik su buharının yoğunlaşarak havanın tamamen doymuş hale geldiği sıcaklıktır. Bu sıcaklığın üzerinde, nem atmosferde kalır ve yoğunlaşma olmaz.

Aylık kuru termometre sıcaklığı, T_k ve çiğ noktası sıcaklığı, T_d verileri her bir zaman noktasında yaş termometre sıcaklığı, T_w , özgül nem, w , su buharının kısmi basıncı, P_v ve bağıl nem, RH değerlerine dönüştürülebilir. Yaş termometre sıcaklığı, T_w , özgül nem, w ve su buharının kısmi basıncı, P_v hesaplamalarında, istasyonun iklimsel aylık ortalama basınç değeri, P kullanılır. Çiğ noktası depresyonu, DPD, havanın çiğ noktasına ulaşabilmesi için ne kadar soğuması gerektiğini derece, °C cinsinden gösterir. Eğer çiğ noktası sıcaklığı, T_d veya yaş termometre sıcaklığı, T_w , kuru termometre sıcaklığına, T eşit olursa ya da çiğ noktası depresyon, DPD değeri sıfır olduğunda hava doymuş hale gelir. Çiğ noktası depresyonu, DPD şu şekilde ifade edilir:

$$DPD = T - T_d \quad (1)$$

Basınç, P (hPa) değeri, istasyon yüksekliği, Z (metre), deniz seviyesindeki ortalama basınç ($P_{msl} = 1013.25$ hPa) ve istasyonun iklimsel aylık ortalama sıcaklığı, T_k (Kelvin) kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$P = P_{msl} \left(\frac{T}{T + 0.065 Z} \right)^{5.625} \quad (2)$$

g/kg cinsinden özgül nem, w su buharı kütesinin nemli hava kütesine oranıdır. Aşağıdaki formülde verildiği şekilde hesaplanabilir:

$$w = 1000 \left(\frac{0.622 P_v}{P - ((1 - 0.622)P_v)} \right) \quad (3)$$

Bağıl nem, RH, havadaki mevcut su buharı miktarının, aynı sıcaklıkta tutulabilecek maksimum su miktarına oranı olarak ifade edilir [15]. Genellikle yüzde (%) olarak ifade edilen bağıl nem, RH, mevcut su buharının kısmi basıncının, P_v , aynı sıcaklıkta hava içindeki doymuş buhar basıncına, P_g oranını gösterir:

$$RH = 100 \left(\frac{P_v}{P_g} \right) \quad (4)$$

Burada P_g , ilgili sıcaklığa karşılık gelen doymuş buhar basıncını ifade etmektedir. Su buharının kısmi basıncı, P_v (hPa) ise, $T_w > 0^\circ\text{C}$ olduğunda şu şekilde hesaplanabilir:

$$P_v = 6.1121 \cdot f_w \cdot \exp \left(\frac{\left(18.729 - \left(\frac{T_d}{227.3} \right) \right) T_d}{257.87 + T_d} \right) \quad (5)$$

$$f_w = 1 + 7 \times 10^{-4} + 3.46 \times 10^{-6} P \quad (6)$$

Denklem (5)'te, doymuş buhar basıncını, P_g elde etmek için çığ noktası sıcaklığı, T_d yerine kuru termometre sıcaklığı, T_k kullanılır. Diğer yandan, $T_w < 0^\circ\text{C}$ olduğunda, su buharının kısmi basıncı, P_v ve doymuş buhar basıncı, P_g değerlerini hesaplamak için aşağıdaki denklemler kullanılır:

$$P_v(\text{ice}) = 6.1115 \cdot f_i \cdot \exp \left(\frac{\left(23.036 - \left(\frac{T_d}{333.7} \right) \right) T_d}{279.82 + T_d} \right) \quad (7)$$

$$f_i = 1 + 3 \times 10^{-4} + 4.18 \times 10^{-6} P \quad (8)$$

Yaş termometre sıcaklığı, T_w , nemli bir fitilin buharlaşma yoluyla soğumasını ölçen bir termometrenin okumasıdır. "Yaş termometre" olarak bilinen bu cihaz, hava doymuş değilse, fitildeki suyun buharlaşmasıyla soğur [16]. Yaş termometre sıcaklığı, T_w , şu şekilde tanımlanır:

$$T_w = \frac{aT + bT_d}{a + b} \quad (9)$$

$$a = 6.6 \times 10^{-5} P \quad (10)$$

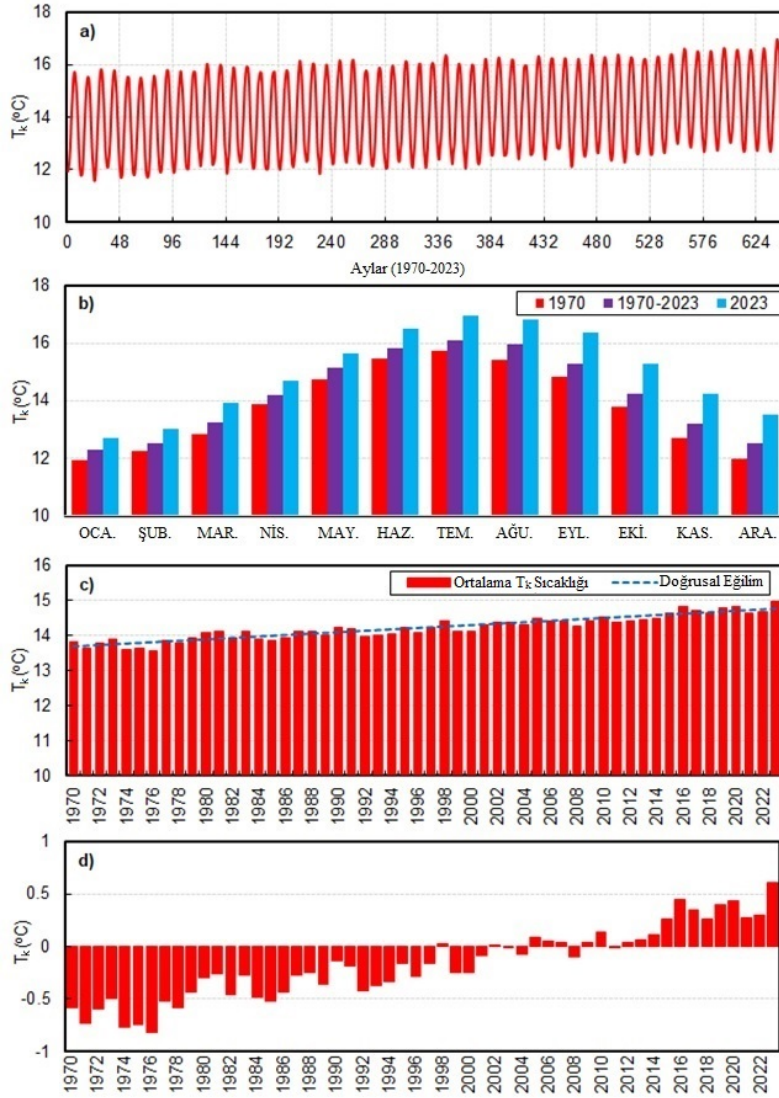
$$b = \frac{409.8P_v}{(T_d + 237.3)^2} \quad (11)$$

Yukarıdaki formüllere dayanarak, 1970-2023 yılları arasında küresel iklim göstergelerindeki değişimler kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Hesaplamalar için gerekli olan kuru termometre sıcaklığı, T_k ve çığ noktası sıcaklığı, T_d verilerinin aylık ve yıllık ortalama değerleri, Climate Reanalyzer platformundan temin edilmiştir [17]. Bu değerler dikkate alınarak çalışma, kuru termometre sıcaklığı, T_k , çığ noktası sıcaklığı, T_d , çığ noktası depresyonu, DPD, özgül nem, w , bağıl nem, RH ve yoğunluk, ρ gibi kritik atmosferik parametrelerdeki eğilimleri belirlemeyi ve analiz etmeyi amaçlamaktadır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Genel olarak, 20. yüzyılın başından itibaren çoğu bölgede kuru termometre sıcaklığı, T değerleri artış göstermiştir. Bu durum, küresel sıcaklıklardaki uzun vadeli bir artış eğilimine işaret etmektedir. Bununla birlikte, sıcaklık artışları tüm bölgelerde eşit olarak gerçekleşmemiştir. Kara yüzeyleri genellikle okyanuslardan daha hızlı bir sıcaklık artışı yaşamıştır ve Arktik bölgesi son yirmi yılda, küresel ortalamanın iki katı oranında ısınmıştır.

Daha yüksek küresel sıcaklık artışlarının olduğu dönemler olduğu gibi, daha yavaş ısınma veya hatta soğuma dönemleri de tespit edilmiştir. Dahası, sıcaklık artışları sürekli artan bir eğilimde olmamıştır. Örneğin, dünyanın ortalama sıcaklığı 1940'lı yıllardan 1970'li yılların ortalarına kadar büyük ölçüde nispeten sabit kalmıştır. Gezegenin ortalama sıcaklığında 1970'lerin sonlarından günümüze kadar daha hızlı bir artış belirlenmiştir. Şekil 1'de 1970-2023 yılları arasında dünyanın ortalama kuru termometre sıcaklığının, T_k istatistiksel analizinin sonuçları sunulmaktadır. İnsan faaliyetleri nedeniyle, 1970 yılından bu yana üretilen sera gazı emisyonlarının miktarında önemli bir artış olmuştur. Atmosfere salınan sera gazı miktarı, fosil yakıtların kullanımı, endüstriyel malların üretimi, ormanların tahribi ve tarımsal faaliyetler de dâhil olmak üzere bir dizi faktörün sonucu olarak önemli ölçüde artmıştır. Bu nedenle, 1970 yılından, 2023 yılına kadar olan dönemde küresel aylık ortalama kuru termometre sıcaklığı, T_k belirgin ölçüde artmıştır. Bu yıllar arasında, en düşük T_k değeri Ocak 1972'de 11,57°C olarak ölçülürken, en yüksek T_k değeri Temmuz 2023'te 16,95 °C olarak kaydedilmiştir. Özellikle 2023 yılında kaydedilen rekor T_k artışı, Şekil 1a'da açıkça görülmektedir. Sonuç olarak, küresel aylık ortalama kuru termometre sıcaklığının, T_k , değerinde 1970-2023 yılları arasında önemli bir artış kaydedilmiştir. Bu yıllar arasında kaydedilen en düşük T_k değeri Ocak 1972'de 11,57°C, en yüksek olarak kaydedilen T_k değeri ise Temmuz 2023'te 16,95°C olmuştur. Şekil 1a'da 2023 yılında kaydedilen kuru termometre sıcaklığının değerinin, ölçüm yapılan yıllar içerisinde en yüksek T değerine ulaştığı çok açık bir şekilde görülmektedir. Şekil 1b, 1970 ve 2023 yıllarına ait aylık küresel ortalama kuru termometre sıcaklığı, T_k verilerinin, 1970-2023 dönemine ait aylık ortalama T_k değerleri ile karşılaştırmasını göstermektedir. Şekil 1b'de verilen grafiklerden de anlaşılacağı üzere, dünya üzerindeki en düşük aylık ortalama T_k değerleri Ocak ayında, en yüksek aylık ortalama T_k değerleri ise Temmuz ayında kaydedilmiştir. Ocak ayına ait ortalama T_k değeri, 1970 yılında 11,94°C iken, 2023 yılında %6,2'lik bir artışla 12,69°C'ye ulaşmıştır. Benzer şekilde, Temmuz ayına ait ortalama T_k değeri 1970 yılında 15,43°C iken, 2023 yılında %7,9'luk bir artışla 16,95°C'ye yükselmiştir. Şekil 1c, 1970 ile 2023 yılları arasındaki ortalama kuru termometre sıcaklığı, T_k verilerinin dağılımını ve eğilim çizgisini göstermektedir. Sanayi öncesi döneme göre 2023 yılı, 1850 yılından bu yana kaydedilen en sıcak yıl olmuştur. 1970 yılında 13,80°C olan yıllık ortalama T_k değeri, 2023 yılında %8,5 artarak 14,97°C'ye yükselmiştir. 2023 yılı öncesinde ise 2016 yılı 14,81°C ile en sıcak yıl olarak kaydedilmiştir. 1970 ile 2023 yılları arasında en düşük yıllık ortalama T_k değeri ise 13,56 °C ile 1976 yılında ölçülmüştür. Şekil 1d, yıllık ortalama kuru termometre sıcaklığı, T_k anomalilerinin dağılımını göstermektedir. Bu veri seti anomalileri, 1991-2020 yılları arası dönemi dikkate alınarak hesaplanmıştır. Şekilden görüldüğü üzere, 2012 yılından itibaren küresel yıllık ortalama anomali değerlerinde pozitif sapmalar gözlemlenmektedir. 2023 yılında kaydedilen 14,97°C'lik küresel yıllık ortalama T_k değeri, 1991-2020 yıllarının ortalaması olan 14,37°C'nin 0,6°C üzerindedir. 2023 yılı öncesinde en yüksek yıllık ortalama anomali değeri 2016 yılında 0,44°C olarak belirlenmişken, 2023 yılında kaydedilen rekor T_k değeri hem dikkat çekici hem de endişe verici olmuştur.

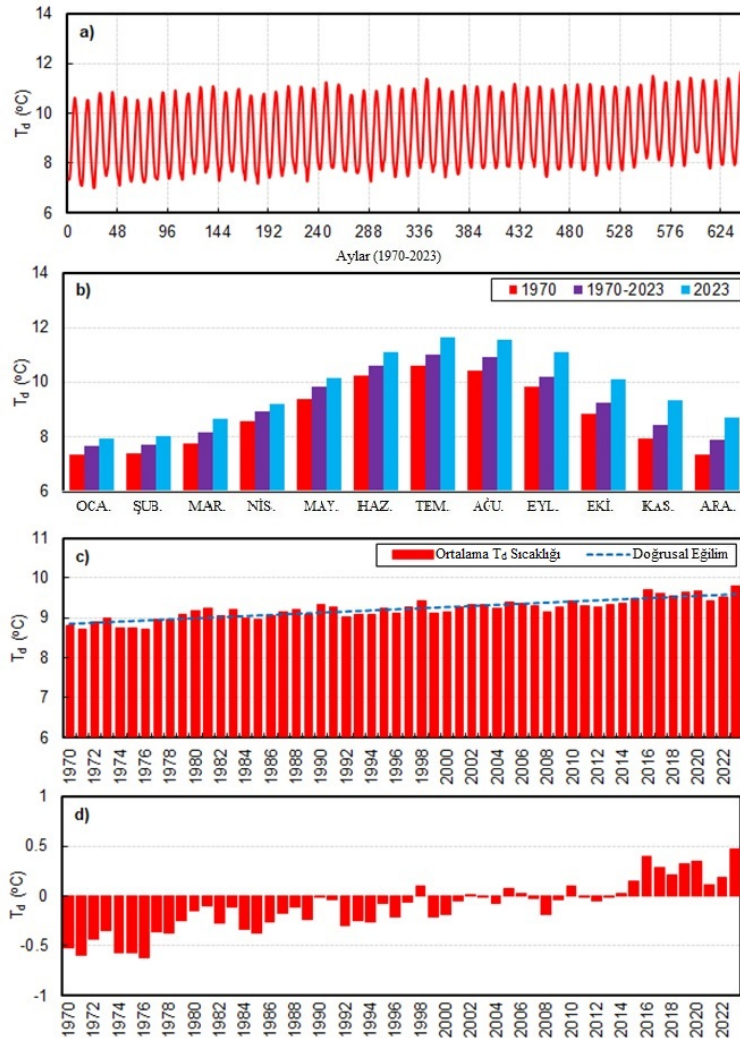


Şekil 1. 1970 ile 2023 yılları arasındaki küresel ortalama kuru termometre sıcaklık verilerinin istatistiksel analizi: a) aylık zaman serisi grafiği, b) 1970 ve 2023 yılları için aylık ortalama kuru termometre sıcaklık verilerinin, 1970-2023 yılları arasındaki döneminin aylık ortalama değerleriyle karşılaştırılması, c) yıllık ortalama kuru termometre sıcaklık verilerinin dağılımı ve trend çizgisi, d) 1991-2020 ortalamasına göre yıllık ortalama kuru termometre sıcaklık anomalilerinin dağılımı

Çiğ noktası sıcaklığı, havadaki nemin doymunluğa ulaştığı sıcaklığı ifade eder ve iklim değişikliği ile ilişkilidir. 1970-2023 yılları arasında yapılan gözlemler, çiğ noktası sıcaklık, T_d değerlerinde küresel bir artış eğilimi olduğunu göstermektedir. Bu artışa katkıda bulunan birincil faktörler arasında atmosferdeki sera gazlarının birikmesi ve küresel ısınmadan kaynaklanan artan buharlaşma yer alır. Su buharı, ısıyı atmosfere etkili bir şekilde ileten ve T_d değerlerinde artışa yol açan güçlü bir sera gazıdır. Havanın daha fazla miktarda su buharı taşıma kapasitesi, deniz yüzeyi sıcaklıklarının artması ve daha sıcak atmosfer koşulları sonucunda artar. Bu yetenek, bölgesel düzeyde atmosfer dinamiklerinde ve yağış döngülerinde değişikliklere yol açar. Bu eğilim, yağış olaylarının dünya genelinde daha sık ve yoğun gerçekleşmesine, ayrıca bağıl nem oranının artmasına ve akşam saatlerinde meydana gelen soğuma miktarının azalmasına neden olur. 1970-2023 yılları arasında, en yüksek çiğ noktası sıcaklık, T_d değeri Ocak 1972'de 7.00°C olarak kaydedilirken, bu değer Temmuz 2023'te 11.64°C ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Çiğ noktası sıcaklık, T_d değerinin aylık ölçek değişiminin detaylı gösterimi Şekil 2a'da yer almaktadır. 2023 yılında çiğ noktası sıcaklığı T_d değerinin önceki yılların ortalama seviyelerinden daha yüksek olması atmosferin nem tutma kapasitesinin arttığını göstermektedir. Bu eğilimler, küresel ısınmadan kaynaklanan buharlaşma ve nem döngülerindeki değişikliklerin gelecekte yoğun yağışlara ve aşırı hava olaylarına yol açabileceğini göstermektedir. Şekil 2b, 1970 ve 2023 yıllarına ait aylık küresel ortalama çiğ noktası sıcaklık, T_d

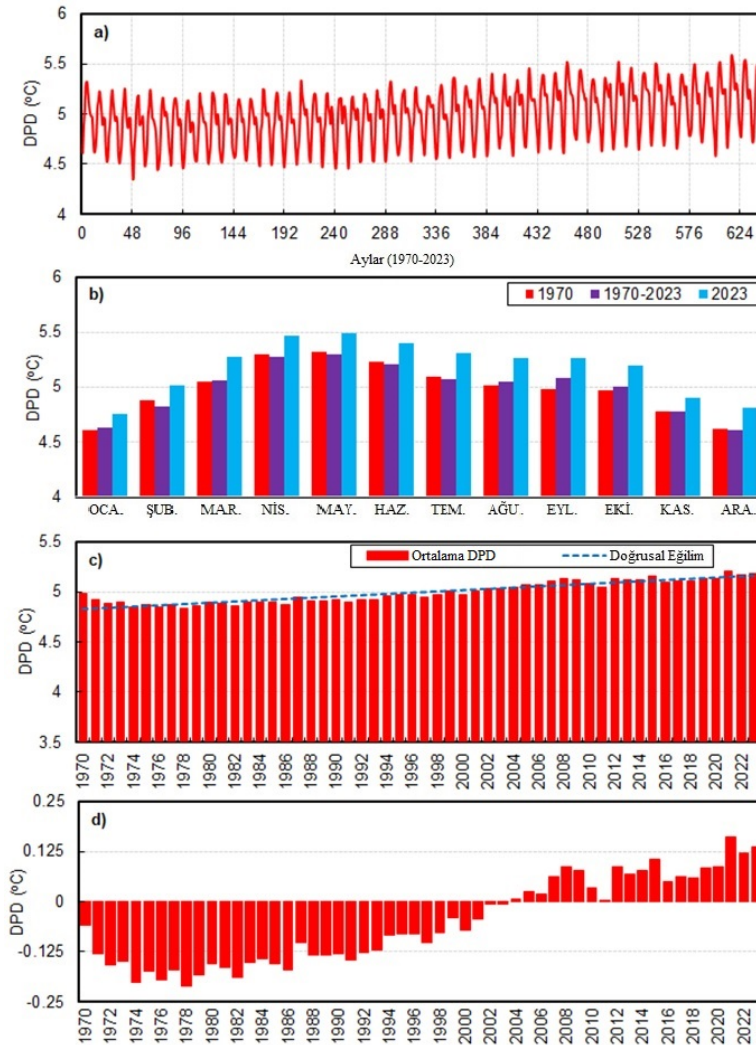
verilerinin, 1970-2023 yılları arasındaki aylık ortalama değerlerle karşılaştırılmasını göstermektedir. Grafikten de anlaşılacağı üzere, dünyadaki en yüksek aylık ortalama T_d değerleri Temmuz aylarında, en düşük aylık ortalama değerler ise Ocak aylarında gözlemlenmiştir. 1970 yılı Ocak ayı ortalama T_d değeri 7.33°C olarak belirlenmiş olup, bu değer Tablo 1b'de yer alan en düşük değerdir. 2023 yılı Ocak ayında ise T_d değeri yaklaşık %8,17 artışla 7.90°C 'ye ulaşmıştır. 2023 yılı Temmuz ayında ortalama T_d değeri $11,64^{\circ}\text{C}$ ile en yüksek değer olarak kaydedilmiştir. 1970 yılıyla karşılaştırıldığında, Temmuz ayı ortalama T_d değeri %9,63 oranında azalarak 10.62°C olarak kaydedilmiştir. Şekil 2c, 1970'ten 2023'e kadar olan yıllık ortalama çığ noktası sıcaklığı, T_d verilerinin değişimini ve eğilim çizgisini göstermektedir. 1970 yılında 8.80°C olan ortalama T_d değeri, 2023 yılına gelindiğinde yaklaşık %10,05 oranında artış göstererek 9.79°C 'ye ulaşmıştır.

Şekil 2d, yıllık ortalama çığ noktası sıcaklık, T_d anomalilerinin dağılımını göstermektedir. Bu anomaliler, 1991-2020 yılları referans dönemi olarak alınarak hesaplanmıştır. Grafikte görüldüğü üzere 2014 yılından bu yana dünya genelindeki ortalama anomali sıcaklık değerlerinde pozitif T_d değer farkları kaydedilmektedir. Bu durum 2014 yılından bu yana devam etmektedir. 2023 yılında 9.79°C olarak kaydedilen küresel ortalama sıcaklık, 1991-2020 yılları arasındaki 9.32°C ortalama değerinin 0.46°C üzerinde kaydedilmiştir. Bu değer, 2023 yılına kadar kaydedilen en yüksek anomali olup, o yıl rekor düzeyde bir T_d artışı tespit edilmiştir.



Şekil 2. 1970 ile 2023 yılları arasındaki küresel çığ noktası sıcaklık verilerinin istatistiksel analizi: a) aylık zaman serisi grafiği, b) 1970 ve 2023 yılları için aylık ortalama çığ noktası sıcaklık verilerinin, 1970-2023 yılları arasındaki döneminin aylık ortalama değerleriyle karşılaştırılması, c) yıllık ortalama çığ noktası sıcaklık verilerinin dağılımı ve trend çizgisi, d) 1991-2020 ortalamasına göre yıllık ortalama çığ noktası sıcaklık anomalilerinin dağılımı

1970-2023 yılları arasındaki çığ noktası depresyon, DPD verilerini gösteren grafik (Şekil 3), bu dönemde çığ noktası depresyonunda genel bir artış eğilimi olduğunu göstermektedir. Bu artıştan, hava sıcaklığı ile çığ noktası sıcaklığı arasındaki farkın zamanla arttığı sonucu çıkarılabilir. Küresel ısınmaya bağlı sıcaklık artışları DPD değerinin yükselmesine neden olurken, belirli dönemlerde ve belirli bölgelerde bağıl nemde yaşanan düşüşler bu farklılığı daha da derinleştirmiştir. Çığ noktası depresyon değerindeki bu uzun vadeli artış, atmosferdeki sıcaklık-nem dengesinin iklim değişikliğiyle bozulduğunu göstermektedir. 1970-2023 yılları arasında en düşük DPD değeri Ocak 1974'te 4,34°C olarak ölçülürken, en yüksek DPD değeri Temmuz 2023'te 5,58°C olarak belirlenmiştir. Şekil 3a aylık ölçekli çığ noktası depresyon, DPD zaman grafiğini açıkça göstermektedir. Yüksek çığ noktası depresyon, DPD değerleri düşük nem koşullarını göstermekte ve bu eğilim iklim değişikliğinin belirli dönemlerde kuraklık riskini artırabileceğini düşündürmektedir. Şekil 3b, 1970 ve 2023 yılları arasındaki aylık küresel ortalama çığ noktası depresyon, DPD verileri ile 1970-2023 yılları arasındaki döneme ait aylık ortalama değerlerin karşılaştırılmasını göstermektedir. Şekilde sunulan verilere göre, dünyada aylık ortalama DPD değerinin en yüksek olduğu ay Aralık ayı iken, en düşük DPD değerinin olduğu ay Mayıs ayı olarak kaydedilmiştir. Öte yandan verilerin yıllık değişimi incelendiğinde, 1970-2023 yılları arasında aylık ortalama DPD değerinin en düşük olduğu ayın Ocak ayı olduğu görülmektedir. Ocak 1970'te ortalama DPD değeri 4,61°C iken, 2023'te yaklaşık %3,19'luk bir artışı yansıtarak 4,75°C'ye yükseldi. Buna karşılık, Mayıs ayı için ortalama DPD değeri 1970'te 5,32°C olarak kaydedilirken, 2023'te %3,21'lik bir artışı yansıtarak 5,49°C'ye yükseldi.

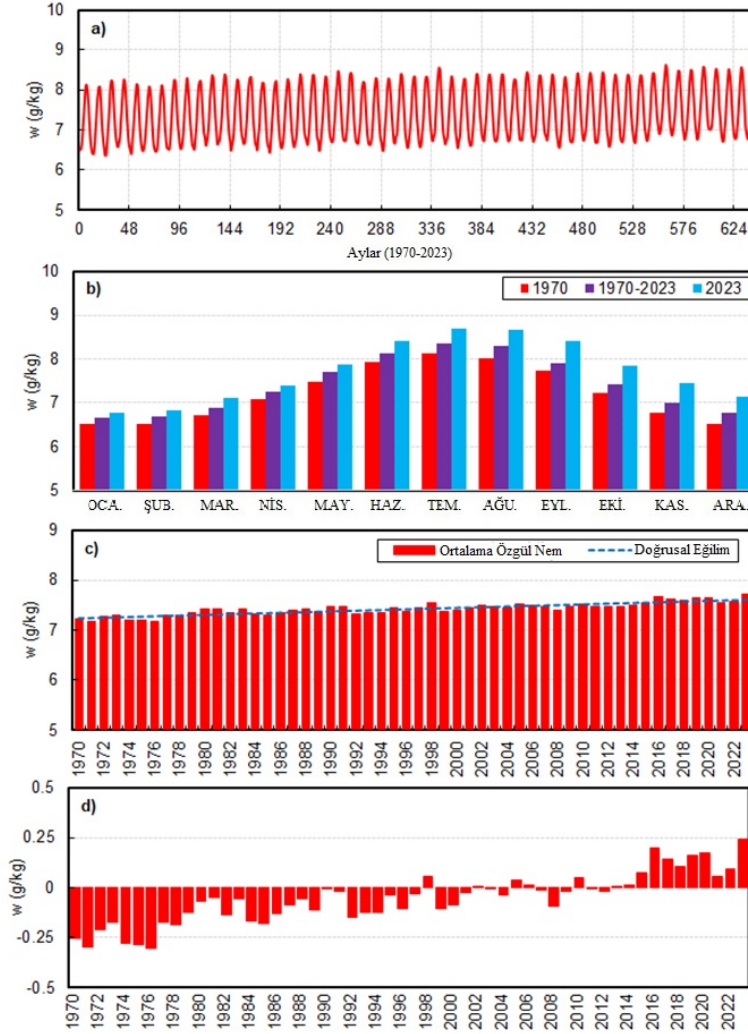


Şekil 3. 1970 ile 2023 yılları arasındaki küresel çığ noktası depresyon verilerinin istatistiksel analizi: a) aylık zaman serisi grafiği, b) 1970 ve 2023 yılları için aylık ortalama çığ noktası depresyon verilerinin, 1970-2023 yılları arasındaki döneminin aylık ortalama değerleriyle karşılaştırılması, c) yıllık ortalama çığ noktası depresyon verilerinin dağılımı ve trend çizgisi, d) 1991-2020 ortalamasına göre yıllık ortalama çığ noktası depresyon anomalilerinin dağılımı

1970 ile 2023 yılları arasında, yıllık ortalama çığ noktası depresyonu, DPD verileri, dağılım ve eğilim çizgisiyle birlikte Şekil 3c'de gösterilmektedir. Toplanan tüm verilere dayanarak, 2021 yılı bu zaman diliminde en yüksek DPD değerine sahip olan yıl olmuştur. 1970 yılında ortalama DPD değeri 4,98 santigrat derece iken, 2023 yılında neredeyse %3,85 oranında artarak 5,17 santigrat dereceye ulaşmıştır. 1978 yılında DPD değeri 4,83 santigrat derece olarak rapor edilmiş olup, bu 1970 ile 2023 yılları arasında kaydedilen en düşük değerdir. En yüksek DPD değeri ise 2021 yılında 5,20°C ile ölçülmüştür. çığ noktası depresyon, DPD anomalileri, yıllık ortalama çığ noktası depresyon oranlarının dağılımını gösteren Şekil 3d'de tasvir edilmiştir. Bu anomalilerin hesaplanmasında 1991'den 2020'ye kadar uzanan bir referans dönemi kullanılmıştır. Grafikte görüldüğü gibi 2004 yılından bu yana tüm gezegenin ortalama anomali sıcaklıklarında pozitif sapmalar yaşanıyor. 2023 yılında küresel ortalama DPD değeri 5,17°C olarak kaydedildi. Bu değer, 1991-2020 yılları arasında kaydedilen 5,04°C ortalamasına göre 0,13°C'lik bir artışı temsil ediyor. 2023 yılına kadar kaydedilen en yüksek anomali değeri 0,16°C ile 2021 kaydedilmiştir. Veriler, başlangıçta negatif anomali değerleri göstererek uzun bir süre normallerin altında kalmış, ancak zamanla pozitif yönde bir artış eğilimi göstermeye başlamıştır. Pozitif anomali değerlerinin özellikle son yıllarda giderek daha belirgin hale gelmesi, küresel iklim değişikliğinin sonuçlarının daha belirgin hale geldiğinin ve bu değişikliğin atmosferdeki özgül nem dengesini bozduğunun bir göstergesidir.

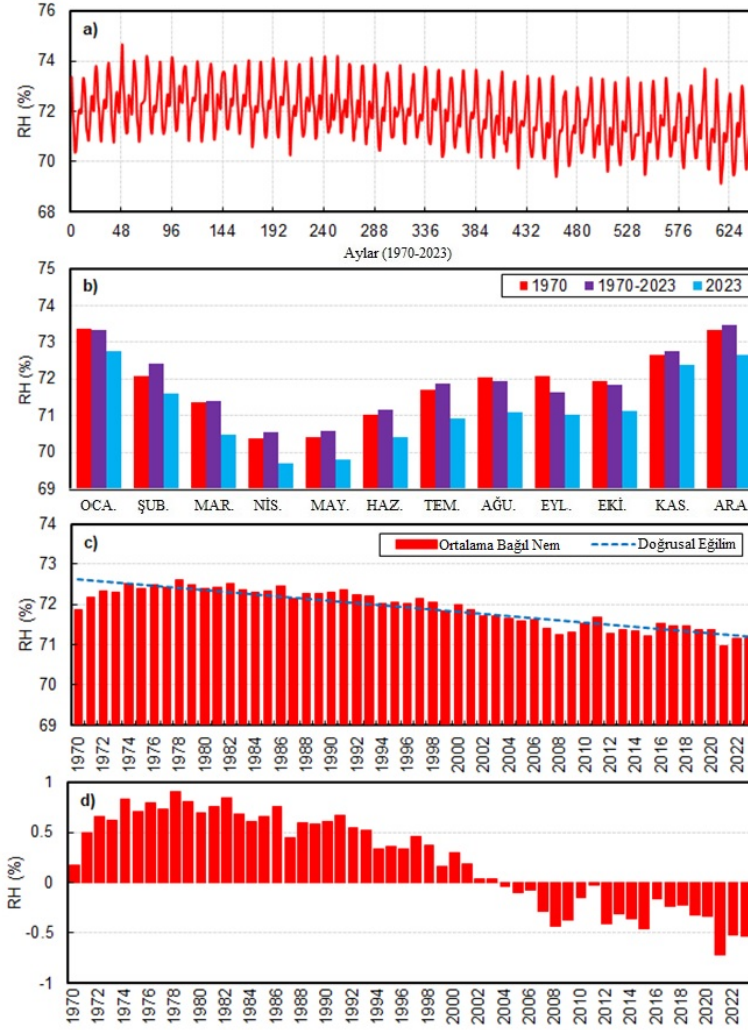
Özgül nem, w için temel belirleyiciler sıcaklık, atmosfer basıncı, rüzgâr dinamikleri ve yüzey su kütlelerinin (okyanuslar, denizler ve büyük göller) mevcudiyetidir. Sıcaklık arttıkça buharlaşma hızı da artar, bu da atmosferde daha fazla su buharının birikmesine ve dolayısıyla daha yüksek w değerlerinin oluşmasına neden olur. Hava kütlelerinin hareketi atmosfer basıncından etkilenir ve bu durum nemli veya kuru hava kütlelerinin belirli bölgelerde yoğunlaşmasına yol açar. Özgül nemdeki değişimler enerji dengesinin ve küresel iklim sisteminin birçok yönünü etkiler. Şekil 4a, aylık ölçek w değerlerinin zaman içindeki değişiminin ayrıntılı bir örneğini sunmaktadır. 1970-2023 yılları arasında ulaşılan en yüksek w değeri Temmuz 2023'te 8,70 g/kg olurken, en düşük w değeri Ocak 1972'de 6,36 g/kg olarak kaydedilmiştir. Şekil 4b, w değerleriyle gösterilen en yüksek aylık ortalama özgül nemin Temmuz ayında meydana geldiğini, en düşük değerlerin ise Ocak ayında gözlemlendiğini göstermektedir. Kaydedilen en düşük ortalama w değeri Ocak 1970'te 6,50 g/kg iken, gözlemlenen en yüksek değer Temmuz 2023'te 8,70 g/kg olmuştur. Şekil 4c'de sunulan veriler, 1976 yılının 1850'den bu yana kaydedilen en düşük özgül nem, w değeri yılı olduğunu göstermektedir. 1970 yılında 7,22 g/kg olan ortalama w , 2023 yılında yaklaşık %7,6 artış göstererek 7,72 g/kg seviyesine ulaşmıştır. Bunu bir perspektife oturtmak gerekirse, bu zaman diliminde özgül nem, w değeri en yüksek olan yıl 2023 yılı olurken, en düşük değer ise 7,17 g/kg ile 1976 yılı olmuştur. Şekil 4d, yıllık ortalama özgül nemdeki anomalilerin dağılımını gösteren bir grafik sunmaktadır. 1991'den 2020'ye kadar olan zaman dilimi, bu anomalilerin hesaplanması için temel teşkil etmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi, küresel ortalama w anomalisi 2013 yılından bu yana sürekli pozitif değişimler göstermektedir. 2023 yılında küresel ortalama w değeri 8,70 g/kg olarak kaydedilmiş olup, bu değer 1991-2020 yılları arasında hesaplanan 8,46 g/kg olan ortalama değerden 0,24 g/kg daha fazladır. Pozitif anomali değeri açısından 2023 yılı en yüksek değere sahip olup bu yılda rekor w değer artışları görülmüştür. Bu yıl aynı zamanda genel olarak en yüksek değere sahiptir.

Bağıl nem, RH kısaca atmosferde bulunan su buharı miktarı ile sıcaklık ve basınç koşulları arasındaki etkileşim tarafından belirlenen bir değişkendir. Bağıl nemde meydana gelen azalma, havanın su buharını tutma kapasitesinin artmasına neden olan sıcaklıktaki artışın sonucudur. Özellikle küresel ısınma nedeniyle artan sıcaklıklar, RH'de genel bir azalma eğilimi oluşturmaktadır. Bağıl nem, RH genellikle artan sıcaklıklar, özellikle de küresel ısınmanın bir sonucu olarak azalmaktadır. Sonuç olarak, bu buharlaşma ve terleme süreçlerinin hızlanmasına neden olur ve bu da kuruluk olasılığını artırır. Şekil 5a, aylık ölçekli bağıl nem oranının zaman grafiğini açık bir şekilde göstermektedir. Grafikte 1970-2023 yılları arasında aylık RH değerlerinde yıllık döngüsel dalgalanmalarla birlikte gözle görülür uzun vadeli bir düşüşü göstermektedir. Mevsimsel değişikliklerin bağıl nem üzerindeki etkileri yıllık döngülere yansır ve bu da yıldan yıla karşılaştırılabilir artma ve azalma eğilimleri gösterir. Öte yandan, bağıl nem, RH seviyelerinin grafikte kademeli olarak düştüğü görülmektedir. Yıllar boyunca bağıl nem, RH değerlerindeki salınımların büyüklüğü nispeten tutarlı kalmasına rağmen, bağıl nem, RH ortalama değerlerinin %69-75 aralığında kademeli olarak azaldığı gözlemlenmiştir. Bu eğilimlerin atmosferde bulunan su buharı miktarında bir azalmaya veya sıcaklık artışlarının RH üzerindeki olumsuz etkilerine işaret etmesi mümkündür. Uzun vadeli iklim değişikliklerinin RH üzerindeki etkilerinin analizini yapabilmek için bu grafik önemli bir kaynaktır. Bu yıllar arasında en yüksek RH oranı Ocak 1975'te %74,64 olarak ölçülmüşken, en düşük oran ise Nisan 2021'te %69,15 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. 1970 ile 2023 yılları arasındaki küresel özgül nem verilerinin istatistiksel analizi: a) aylık zaman serisi grafiği, b) 1970 ve 2023 yılları için aylık ortalama özgül nem, w verilerinin, 1970-2023 yılları arasındaki döneminin aylık ortalama değerleriyle karşılaştırılması, c) yıllık ortalama özgül nem verilerinin dağılımı ve trend çizgisi, d) 1991-2020 ortalamasına göre yıllık ortalama özgül nem anomalilerinin dağılımı

Şekil 5b, aylık küresel ortalama bağıl nem, RH değerini göstermektedir. Bu şekil, 1970'ten 2023'e kadar olan aylık ortalama değerlerin, 1970 ve 2023 yılları arasındaki döneminin belirli aylık ortalama değerleriyle karşılaştırılmasını sunmaktadır. Grafik incelendiğinde en yüksek aylık ortalama bağıl nem oranının Aralık ayında %73,46 olduğu, en düşük oranın ise Nisan ayında gerçekleştiği görülmektedir. Ortalama bağıl nem, RH değerlerinin 1970 ve 2023 yılları karşılaştırıldığında genel ortalamadan daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu olgu grafikte gözlenen mevsimsel değişikliklere bağlanabilir. Ayrıca grafikte gösterilen en düşük RH oranı Nisan 2023'te %69,70 olarak kaydedilmiştir. Şekil 5c, 1970'ten 2023'e kadar yıllık ortalama RH verilerinin dağılımını ve bunların ilerleme eğilim çizgisini göstermektedir. Veriler, bu zaman diliminde en büyük değer kaydedildiği yılın 1978 olduğunu gösteriyor. 1970 yılında ortalama 71,86% olan RH değeri ile karşılaştırıldığında, 2023 yılındaki değer yaklaşık %0,98 oranında düşerek 71,15% olarak gerçekleşmiştir. Bu zaman diliminde bağıl nem oranında nispeten küçük bir değişim yaşanmış olmakla birlikte, takip eden yıllarda yaşanan dalgalanmalar oldukça önemlidir. 1978 yılında kaydedilen en yüksek değer olan 72,59% ile 2021 yılında kaydedilen en düşük değer olan 70,96% arasında yaklaşık %2,24 oranında bir düşüş olduğu belirlenmiştir. Şekil 5d, karşılaştırma çerçevesi olarak 1991 ile 2020 arasındaki zaman periyodunu kullanarak hesaplanan bağıl nem, RH anomalilerini göstermektedir. Şekil daha yakından incelendiğinde, 2004 yılından bu yana dünya çapındaki ortalama RH anomalisi okumalarında negatif sapmaların olduğu görülmektedir. 2023 yılında, küresel ortalama RH oranı %71,15 olarak kaydedilmiştir. 2023 yılına kadar gözlemlenen en düşük anomali değeri ise %0,72 ile 2021 yılında kaydedilmiştir.

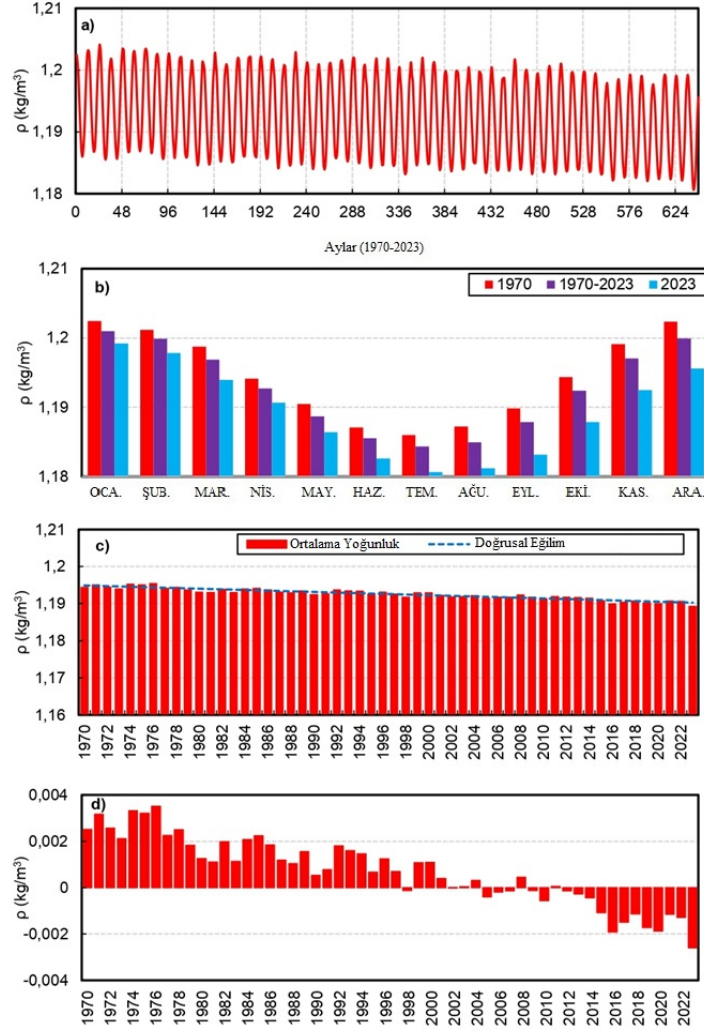


Şekil 5. 1970 ile 2023 yılları arasındaki küresel bağıl nem verilerinin istatistiksel analizi: a) aylık zaman serisi grafiği, b) 1970 ve 2023 yılları için aylık ortalama bağıl nem verilerinin, 1970-2023 yılları arasındaki döneminin aylık ortalama değerleriyle karşılaştırılması, c) yıllık ortalama bağıl nem verilerinin dağılımı ve trend çizgisi, d) 1991-2020 ortalamasına göre yıllık ortalama bağıl nem anomalilerinin dağılımı

1970-2023 yılları arasında dünya genelinde hava yoğunluğunda yaşanan azalma, küresel ısınmanın getirdiği sıcaklık artışının yanı sıra atmosferde özellikle karbondioksit olmak üzere sera gazlarının birikmesinden kaynaklandığı öngörülmektedir. Şekil 6a aylık ölçekli atmosferik yoğunluk, ρ değerinin zamanla değişim grafiğini açık bir şekilde göstermektedir. Artan sıcaklık, havanın genişlemesine yol açarak birim hacimdeki molekül sayısını azaltmış, bu da atmosferik yoğunluk, ρ miktarında azalmaya neden olmuştur. İklim değişikliğine bağlı olarak troposferdeki basınç farklarının ve nemin artması, yoğunluktaki azalmayı hızlandırmıştır. 1970 ve 2023 yılları arasında en yüksek ρ değeri Ocak 1972'de $1,204 \text{ kg/m}^3$ olarak ölçülmüşken, en düşük ρ değeri Temmuz 2023'te $1,1806 \text{ kg/m}^3$ olarak kaydedilmiştir. Şekil 6b, 1970 ve 2023 aylık küresel ortalama yoğunluk, ρ verilerinin, 1970-2023 yılları arasındaki döneminin aylık ortalama değerleriyle karşılaştırılmasını göstermektedir. Grafikte küresel olarak en yüksek aylık ortalama ρ değerlerinin Ocak ayında, en düşük aylık ortalama ρ değerlerinin ise Temmuz ayında kaydedildiği görülmektedir. Ocak ayının ortalama yoğunluğu 1970 yılında $1,202 \text{ kg/m}^3$ iken, 2023 yılında yaklaşık %0,14'lik oranla $1,199 \text{ kg/m}^3$ değerine düşmüştür. Öte yandan, Temmuz ayının ortalama ρ değeri 1970 yılında $1,186 \text{ kg/m}^3$ iken, 2023 yılında %0,45'lik düşüşle $1,180 \text{ kg/m}^3$ 'e ulaşmıştır.

Şekil 6c, 1970 ile 2023 yılları arasındaki yıllık ortalama yoğunluk, ρ verilerinin dağılımını ve eğilim çizgisini göstermektedir. Elde edilen verilere göre, 2023 yılı, 1850 yılından bu yana kayıtlardaki en düşük yoğunluğa sahip yıl olmuştur. 1970 yılında $1,194 \text{ kg/m}^3$ olan ortalama ρ değeri, 2023 yılında yaklaşık

%0.43 azalarak $1,189 \text{ kg/m}^3$ olarak kaydedilmiştir. Şekil 6d, yıllık ortalama yoğunluk, ρ anomalilerinin dağılımını göstermektedir. Bu veri seti anomalileri, 1991 ila 2020 referans alınarak hesaplanmıştır. Şekilden de görüleceği üzere 2012 yılından bu negatif ρ anomali değerlerinin farkları gözlenmektedir.



Şekil 6. 1970 ile 2023 yılları arasındaki küresel yoğunluk verilerinin istatistiksel analizi: a) aylık zaman serisi grafiği, b) 1970 ve 2023 yılları için aylık ortalama yoğunluk verilerinin, 1970-2023 yılları arasındaki döneminin aylık ortalama değerleriyle karşılaştırılması, c) yıllık ortalama yoğunluk verilerinin dağılımı ve trend çizgisi, d) 1991-2020 ortalamasına göre yıllık ortalama yoğunluk anomalilerinin dağılımı

5. SONUÇLAR

Bu çalışmaya temel oluşturan 1970-2023 yılları arasındaki küresel verilere dayalı analizler, küresel kuru termometre sıcaklığı, T_k , çiy noktası sıcaklığı, T_d , bağıl nem, RH ve atmosferik yoğunluk, ρ gibi iklim göstergelerinde belirgin değişiklikler olduğunu ortaya koymaktadır. Çalışmanın sonuçları, sıcaklıktaki artışın kuraklık ve yoğun yağış gibi aşırı hava olaylarının sıklığında artışa yol açabileceğini vurgulamaktadır. Bunun nedeni, kuru termometre sıcaklığındaki (%8,5) artışın atmosferdeki su buharı miktarında artışa yol açmasıdır. Bu durum, çiy noktası sıcaklıklarının yükselmesine (%10,05), mutlak nemin değişmesine ve gece soğumasının azalmasına neden olur. Bağıl nem ve çiy noktası düşüşü verilerinde görülen değişimler, küresel iklim sisteminin istikrarsızlaştığını gösteriyor. Bağıl nemdeki düşüş (%0,98) ile buharlaşmadaki artış arasında, özellikle sıcaklık daha yüksek olduğunda, bir korelasyon vardır. Bu olgu, atmosferin daha kuru hale geldiği zaman sayısında bir artış olduğunu gösterir. 2023 yılına ait verilerin analizinden elde edilen bulgulara göre, bu yılda küresel sıcaklık ve çiy noktası ölçümlerinin rekor seviyelere ulaştığı belirlendi. Bu durum iklim değişikliğinin etkilerinin hızla arttığını, sera gazı

emisyonlarının kontrol altına alınmaması durumunda bu eğilimlerin daha da kötüleşebileceğini göstermektedir.

Çalışmanın bulguları, iklim değişikliğiyle mücadele kapsamında sera gazı emisyonlarını sınırlamayı amaçlayan tedbirlerin sıkılaştırılması ve değişen iklim koşullarına uyumun sağlanması gerektiğini ortaya koymaktadır. İklim değişikliğinin olası sonuçları göz önüne alındığında, su kaynaklarının yönetiminin, tarımsal planlamanın ve altyapı yatırımlarının bölgesel ve küresel ölçekte yeniden yapılandırılması büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, iklimin uzun vadeli izlenmesi ve modellenmesini içeren araştırmalar, gelecekteki iklim değişikliklerinin tahmin edilmesi ve uyum programlarının oluşturulması sürecinde önemli bir rol oynayacaktır. Daha önce yayınlanmış çalışmalarda yer alan bilgilerle uyumlu bulgular ortaya koyan bu çalışma sonucunda, iklim değişikliğinin dünya çapındaki etkilerine ilişkin somut analizler sunarak, bu etkilerin sonuçlarının anlaşılabilirliğinin artmasına katkı sağlamıştır. Öte yandan değişen iklim koşullarına karşı önleyici adımlar atılmazsa küresel ısınmanın olumsuz etkilerinin daha da şiddetli hale gelebileceği öngörülmüştür. Sonuç olarak, sürdürülebilir kalkınma ve iklim değişikliğine uyum stratejilerinin oluşturulması ve sera gazı emisyonlarının sınırlandırılmasına yönelik acilen harekete geçilmesi büyük bir önem taşımaktadır.

6. KAYNAKLAR

1. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2021). Climate change 2021: The physical science basis. *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
2. Bilgili, M., Tımse, S. & Nar, S. (2024). Comprehensive overview on the present state and evolution of global warming, climate change, greenhouse gasses and renewable energy. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49, 14503-14531.
3. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), (2023). Greenhouse gases continued to increase rapidly in 2022. *NOAA*. <https://www.noaa.gov/news-release/greenhouse-gases-continued-to-increase-rapidly-in-2022>
4. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2022). Climate change 2022: Mitigation of climate change. *IPCC Sixth Assessment Report*.
5. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2013). Climate change 2013: The physical science basis. *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
6. Faquseh, H. & Grossi, G. (2024). Trend analysis of precipitation, temperature and snow water equivalent in Lombardy region, northern Italy. *Sustainable Water Resources Management*, 10(18), 1-15.
7. Kliengchuay, W., Mingkhwan, R., Kiangkoo, N., Suwanmanee, S., Sahanavin, N., Kongpran, J., Wai Aung, H. & Tantrakarnapa, K. (2024). Analyzing temperature, humidity, and precipitation trends in six regions of Thailand using innovative trend analysis. *Scientific Reports*, 14(7800).
8. Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R., Lo, K., Lea, D. W. & Medina-Elizade, M. (2010). Global surface temperature change. *Reviews of Geophysics*, 48(4), RG4004.
9. Held, I.M. & Soden, B.J. (2006). Robust responses of the hydrological cycle to global warming. *Journal of Climate*, 19(21), 5686-5699.
10. Dessler, A.E. (2010). A determination of the cloud feedback from climate variations over the past decade. *Science*, 330(6010), 1523-1527.
11. Trenberth, K.E., Fasullo, J.T. & Smith, L. (2009). Trends and variability in column-integrated atmospheric water vapor. *Climate Dynamics*, 32(6), 741-758.
12. Wang, J. & Gaffen, D.J. (2001). Late-twentieth-century climatology and trends of surface humidity and temperature in China. *Journal of Climate*, 14(22), 2843-2855.
13. Dai, A. (2006). Recent climatology, variability, and trends in global surface humidity. *Journal of Climate*, 19(15), 3589-3606.
14. Willett, K.M., Gillett, N.P., Jones, P.D. & Thorne, P.W. (2010). Recent changes in surface humidity: Development of the HadISDH dataset. *Journal of Climate*, 23(8), 1954-1973.
15. Willett, K.M., Williams, C.N. Jr., Dunn, R.J.H., Thorne, P.W., Bell, S., de Podesta, M., Jones, P.D. & Parker, D.E. (2013). HadISDH: An updateable land surface specific humidity product for climate monitoring. *Climate of the Past*, 9(2), 657-677.

16. Willett, K.M., Dunn, R.J.H., Thorne, P.W., Bell, S., de Podesta, M., Parker, D.E. & Jones, P.D. (2014). HadISDH: Land surface multi-variable humidity and temperature record for climate monitoring. *Climate of the Past*, 10(6), 1983-2006.
17. Climate Reanalyzer. (n.d.). *Monthly maps*. University of Maine. Retrieved October 30, 2024, from https://climatereanalyzer.org/research_tools/monthly_maps/

Aktivasyon Kimyasal Türlerinin Metilen Mavisi Adsorpsiyonuna Etkilerinin İzoterm ve Kinetik Modelleri Kullanılarak İncelenmesi

İsmail Yiğit SEÇKİN^{1,a}

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

^aORCID: 0000-0003-1212-656X

Makale Bilgileri

Geliş : 13.02.2025

Kabul : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665940

Sorumlu Yazar

İsmail Yiğit SEÇKİN

yseckin@cu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Aktif karbon

Piroliz

Adsorpsiyon

Atf şekli: SEÇKİN, İ.Y., (2025). Aktivasyon Kimyasal Türlerinin Metilen Mavisi Adsorpsiyonuna Etkilerinin İzoterm ve Kinetik Modelleri Kullanılarak İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(1), 141-151.

ÖZ

Bu çalışmada, bazik, nötr ve asidik olmak üzere sırasıyla KOH, ZnCl₂, H₃PO₄ aktivasyon kimyasalları ile aktivasyon işlemine tabi tutulan atık zeytin çekirdeklerinden 3 farklı aktif karbon elde edilmiştir. Mevcut çalışma ile aktif karbon eldesinde kullanılan aktivasyon kimyasallarının türü ve tipinin metilen mavisi adsorpsiyon mekanizmasına etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Sentezlenen aktif karbonlarla metilen mavisinin adsorpsiyon çalışmaları gerçekleştirilerek giderim mekanizmalarına ve kimyasına etkileri incelenmiştir. Elde edilen kinetik ve izoterm verileri ile de metilen mavisi giderimindeki mekanizmalar ve kirletici-adsorban ilişkileri belirlenmiştir. KOH aktivasyonunun aktif karbon yüzeyinde yüksek miktarda aktif bölge oluşumu sağladığı, ZnCl₂ ve H₃PO₄ aktivasyonlarında ise aktif karbon yüzeyinde adsorpsiyona direnç gösteren bir tabaka varlığı olduğu tespit edilmiştir. Direnç tabakasının H₃PO₄ aktivasyonunda ise daha kalın olduğu ve metilen mavisi adsorpsiyonuna daha yüksek direnç gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca, üç aktivasyon kimyasalıyla da elde edilen aktif karbonlar ile kimyasal ve tersinir adsorpsiyon gerçekleştirildiği sonucuna ulaşılmıştır.

Investigation Effects of Activating Agent Types on Methylene Blue Adsorption with Using Isotherm and Kinetic Models

Article Info

Received : 13.02.2024

Accepted : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665940

Corresponding Author

İsmail Yiğit SEÇKİN

yseckin@cu.edu.tr

Keywords

Activated carbon

Pyrolysis

Adsorption

How to cite: SEÇKİN, İ.Y., (2025). Investigation Effects of Activating Agent Types on Methylene Blue Adsorption with Using Isotherm and Kinetic Models. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(1), 141-151.

ABSTRACT

Three different activated carbons were obtained from waste olive stones through activation with KOH (basic), ZnCl₂ (neutral), and H₃PO₄ (acidic), respectively. This study aimed to specify the effects of various activating agent types on the methylene blue dye adsorption mechanism. Adsorption experiments of methylene blue were conducted using these activated carbons to investigate their effects on removal mechanisms and adsorption chemistry. The kinetic and isotherm data obtained were used to determine the removal mechanisms of methylene blue and the pollutant-adsorbent interactions. It was found that KOH activation led to the formation of a high number of active sites on the activated carbon surface, whereas ZnCl₂ and H₃PO₄ activation resulted in the presence of an adsorption-resistant layer on the surface. This resistance layer was observed to be thicker in H₃PO₄ activation, leading to greater resistance to methylene blue adsorption. Additionally, it was concluded that the activated carbons obtained with all three activation chemicals exhibited both chemical and reversible adsorption.

1. GİRİŞ

Tekstil, kağıt, deri ve boya üretimi endüstrilerinde boyar maddeler yaygın olarak kullanılan üretim maddeleridir. Boyar maddelerin insan sağlığına olumsuz etkileri ve mikroorganizmalar için toksik özellikleri olması nedeniyle bu endüstrilerden kaynaklı atıksulardan boyar madde giderimine verilen önem giderek artmaktadır [1]. Özellikle su tüketimi çok yüksek miktarlarda olan tekstil endüstrisinden kaynaklanan atıksular sucul yaşam ve çevre sağlığı açısından büyük endişe yaratmaktadır. Tekstil endüstrisinde oluşan atıksular ağartma, yıkama ve boyama işlemlerinden kaynaklanmaktadır. Bu işlemlerde yer alan üretim kimyasalları, boyalar ve ham maddelerin çeşitliliği atıksu karakteristiğinde kompleks bir kimyasal içerik oluşturmaktadır. Özellikle boyama işleminde kullanılan asidik, bazik, reaktif ve direkt gibi boya tipleri, tekstil atıksularının karakteristiğini önemli ölçüde etkilemektedir [2]. Metilen mavisi de boyama işleminde yaygın olarak kullanılan boyalardan bir tanesidir. Tekstil endüstrisinde pamuk, yün ve ipek boyamada sıklıkla kullanılmaktadır. Metilen mavisi insan ve hayvanlarda göz yanmasına, methemoglobinemiye, siyanoza, taşikardiye ve cilt tahrişlerine sebep olmaktadır [3].

Boya içeren atıksular, çeşitli fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma yöntemleri ile arıtılabilmektedirler. Adsorpsiyon, ekstraksiyon ve membran filtrasyon başlıca tercih edilen arıtma yöntemleri arasındadır [4-8]. Bu yöntemler içerisinde adsorpsiyon ile boya giderimi, kolay işletme, düşük maliyet ve verimlilik gibi özelliklerinden dolayı öncelikli olarak tercih edilen bir arıtma metodudur [9,10].

Atıksulardan adsorpsiyon yöntemi ile boya giderimi, aktifleştirilmiş bitümlü kömür, kil, kenevirde elde edilmiş karbon, fosfat kayacı, bitki yaprakları, meyve çekirdekleri ve çekirdek kabukları, çeltik kabuğu, biyokütleden elde edilmiş aktif karbonlar gibi malzemelerle gerçekleştirilmektedir [11]. Aktif karbonlar, geniş yüzey alanları ve yüzeylerinde bulunan fonksiyonel gruplar sayesinde atıksulardan boya gideriminde en etkili adsorpsiyon malzemesidir. Aktif karbon üretimi karbonizasyon ve aktivasyon basamaklarına dayalı olarak gerçekleştirilmektedir [12,13]. Karbonizasyon işlemi ile aktif karbonun elde edileceği ham maddenin sahip olduğu uçucu içerik 300 °C ile 900 °C arasında değişen sıcaklıklarda uzaklaştırılmaktadır. Aktivasyon işleminde ise, elde edilen ürüne daha yüksek yüzey alanı, pürüzlülük ve kendine has kimyasal özellikler kazandırılmaktadır. Aktivasyon işlemi, fiziksel, kimyasal ve biyolojik olarak 3 farklı yolla gerçekleştirilebilmektedir[14]. Kimyasal aktivasyon, diğer aktivasyon işlemlerine kıyasla daha düşük sıcaklıklarda ve sürelerde gerçekleştirilebildiğinden enerji verimliliği ve düşük maliyet açısından avantajlı bir işlem olarak öne çıkmaktadır [15-19]. Kimyasal aktivasyon, aktif karbonun hammaddesi ile NaOH, KOH, K₂CO₃, ZnCl₂, H₃PO₄ gibi aktivasyon kimyasalları ile birlikte pirolize tabi tutulma işlemidir. Kullanılan aktivasyon kimyasalının tipi elde edilecek aktif karbonun özelliklerini belirleme açısından büyük önem taşımaktadır. Literatürde kimyasal aktivasyon işlemi ile aktif karbon sentezi gerçekleştirilen birçok çalışma yer almaktadır. Majoudi ve arkadaşları, ZnCl₂ aktivasyon kimyasalı kullanarak yağlı çamurdan aktif karbon eldesi gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, 1258 cm²/g yüzey alanı elde etmeyi başarmışlardır [20]. Ruffor ve arkadaşları ise, FeCl₃, ZnCl₂ ve MgCl₂ aktivasyon kimyasallarının elde edilen aktif karbonun grafitizasyon derecelerine (I_B/I_G) etkilerini kıyaslamışlardır ve ZnCl₂ ile en iyi grafitizasyon derecesini sağladıklarını belirtmişlerdir. Xi ve arkadaşları, potasyum bazlı aktivasyon kimyasallarının aktif karbon gözenek hacmine etkilerini incelemişlerdir. 900 °C sıcaklıkta K₂CO₃ aktivasyonu ile elde ettikleri aktif karbonda 2.03 cm³/g gözenek hacmi sağlayarak en yüksek değeri elde etmişlerdir [21]. Hapiz ve arkadaşları, ananas meyvesine ait taç yapraklarından ZnCl₂ aktivasyonu ile aktif karbon eldesi gerçekleştirerek metilen mavisi adsorpsiyonu gerçekleştirmişlerdir. Çalışmaları sonucunda 1070 m²/g yüzey alanına sahip aktif karbon eldesi gerçekleştirdiklerini bildirmişlerdir [22]. Yaacoubi ve arkadaşları ise zeytin çekirdeğinden elde edilmiş aktif karbon ile sodyum aljinatı kullanarak kompozit malzeme eldesi gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri malzeme ile metilen mavisi adsorpsiyonu gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada malzeme üzerinde gerçekleştirilen FTIR analizleri ile malzeme üzerinde tespit edilen hidroksil ve karbonil fonksiyonel gruplarının metilen mavisi adsorpsiyonunda etkili olduğunu vurgulamışlardır [23]. Hashem ve arkadaşları yerfistiği kabukları ile 600 °C'de ZnCl₂ kullanarak aktif karbon eldesi gerçekleştirmişlerdir. Sentezlenen aktif karbonun yüzey pH değerinin nötr olduğu bildirilmiştir [24]. Dalmaz ve Özak, atık sigara izmaritlerinden ZnCl₂ aktivasyonu ile aktif karbon sentezlemişlerdir. Aktif karbona ait yüzey taramalı elektron mikroskobu ile gerçekleştirilen analizlerde aktif karbon yüzeyinin düzensiz bir morfolojiye sahip olduğunu ve yüzeyde geniş dairesel gözeneklerin oluştuğunu belirtmişlerdir [25]. Bu çalışmalarda, genel olarak aktivasyon kimyasallarının aktif karbonların fizikokimyasal özelliklerine etkileri incelenmiştir. Buna karşın, aktivasyon kimyasallarının adsorpsiyon mekanizmasına etkisinin incelenmesi konusunda yapılan çalışmalar oldukça kısıtlıdır. Adsorpsiyon işlemi esnasında aktif karbon ve kirletici arasındaki etkileşimin belirlenmesi, endüstriyel adsorpsiyon

proseslerinin tasarımı, optimizasyonu ve işletme problemlerinin çözülmesi konusunda kritik bir öneme sahiptir. Adsorpsiyon izoterm ve kinetik modelleri, kirletici ve aktif karbon arasındaki etkileşimi belirlemek için kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, tekstil endüstrisinde renk parametresine neden olan boyar maddelerin atık zeytin çekirdeğinden elde edilen aktif karbon ile gideriminde aktivasyon kimyasalı türünün adsorpsiyon mekanizmasına etkisi izoterm ve kinetik modelleri kullanılarak belirlenmeye çalışılmıştır. Asidik, nötr ve bazik olmak üzere 3 farklı aktivasyon kimyasalı kullanılmıştır. Çalışmada, katılara tutunma eğilimi yüksek olduğu ve organik kirletici içeren renkli atıksularda model kirletici olarak kabul gördüğü için boyar madde olarak metilen mavisi kullanılmıştır [26]. Çevresel açıdan büyük endişeler yaratan boyar maddelerin adsorpsiyonunda kullanılacak olan aktif karbonların üretiminde seçilecek aktivasyon kimyasalının türü büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma ile literatürde eksikliği bulunan boya gideriminde kullanılacak aktif karbonların üretimi için uygun aktivasyon kimyasalı seçimi konusuna katkı sağlanması amaçlanmıştır.

2. YÖNTEM

2.1. Aktif Karbon Sentezinde Kullanılan Ham Madde ve Kimyasallar

Çalışmada aktif karbon eldesi için Adana İli'nde faaliyet gösteren zeytinyağı üretim tesisinden atık olarak çıkan zeytin çekirdeği granülleri kullanılmıştır (Şekil 1). Zeytin çekirdeği granülleri saf suyla yıkandıktan sonra 70 °C'de 24 saat etüvde kurutulduktan sonra aktif karbon sentezine hazır hale getirilmiştir.



Şekil 1. Zeytin çekirdeği granülleri

Kimyasal aktivasyon işlemi için ise analitik saflıktaki Merck marka KOH, ZnCl₂ ve H₃PO₄ kimyasalları kullanılmıştır. Metilen mavisi çözeltilerinin hazırlanmasında ise deiyonize su ve AFG Bioscience marka metilen mavisi boyası kullanılmıştır.

2.2. Aktif Karbon Eldesi

Çalışmada aktif karbon sentezi iki basamaklı piroliz yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, zeytin çekirdeği granülleri, 700 °C'de 2 saat boyunca pirolize tabi tutularak biyokömür eldesi sağlanmıştır. Biyokömürler ortam sıcaklığına gelene kadar piroliz ortamında bekletilmiş ve daha sonraki işlemler için desikatörde muhafaza edilmiştir.

Aktivasyon işlemi için 10'ar g alınan biyokömürler 250 mL hacmindeki cam erlenler içerisinde KOH, ZnCl₂ ve H₃PO₄ çözeltileri içerisinde, Velp marka inkübatörde 25°C'de, 24 saat süre ile manyetik karıştırıcı ile karıştırılarak impregnasyon işlemine tabi tutulmuştur.

İmpregnasyon işlemi, 1:1 kütle oranında (aktivasyon kimyasalı/biyokömür), 1:10 g/mL (g biyokömür/mL çözelti) katı sıvı oranında gerçekleştirilmiştir. Daha sonra çözelti ve biyokömür karışımı filtre edilerek ayrılan biyokömler 70 °C'de 24 saat kurularak aktif karbon sentezi için hazır hale getirilmişlerdir. Devamında impregnasyona tabi tutulmuş 10'ar g'lık biyokömlere ayrı ayrı 750 °C sıcaklıkta 2 saat boyunca ikinci bir piroliz işlemi gerçekleştirilerek aktif karbon eldesi sağlanmıştır. Piroliz işlemlerinin tamamı Protherm marka yakma fırınında, ortalama 15 °C/dak ısınma hızında ve 8 L/sa'lik N₂ gaz atmosferi (inert ortam) altında gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen aktif karbonlar Çizelge 1'deki şekilde adlandırılmışlardır.

Çizelge 1. Sentezlenen aktif karbonlar

Aktivasyon kimyasalı	Elde edilen aktif karbon
KOH	AK-K
ZnCl ₂	AK-Zn
H ₃ PO ₄	AK-P

2.3. Aktif Karbon Sentezinde Kullanılan Ham Madde ve Kimyasallar

Elde edilen aktif karbonların sulu çözüldüden metilen mavisi giderimi verimleri kesikli reaktör çalışma prensibine dayalı olarak gerçekleştirilen adsorpsiyon çalışmaları ile belirlenmiştir. Adsorpsiyon çalışmaları, hidrolik bekleme süresi ve metilen mavisi başlangıç konsantrasyonu değişkenleri ile gerçekleştirilmiştir. Çizelge 2'de çalışmada kullanılan değişkenlere ait değerler verilmiştir. Metilen mavisi konsantrasyonları HACH DR6000 marka ve modele sahip UV spektrofotometre ile 665 nm dalga boyunda ölçülmüştür.

Çizelge 2. Metilen mavisi adsorpsiyonu çalışmalarına ait değişkenler ve değerler

Değişkenler	Değerler
Süre (dak)	10 – 20 – 30 – 40 – 50 - 60
Başlangıç konsantrasyonu (mg/L)	9,2 - 18,7 – 27,5 – 40,3 – 50,2 – 60,3

Kesikli adsorpsiyon deneylerinde adsorpsiyon verimi ve birim adsorban kütlesi başına giderilen metilen mavisi miktarı t bekleme süresi için sırasıyla eşitlik (1) ve eşitlik (2) ile hesaplanmıştır.

$$Verim (\%) = \frac{C_0 - C_t}{C_0} * 100 \quad (1)$$

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t) * V}{M} \quad (2)$$

Yukarıdaki eşitliklerde C₀, başlangıç metilen mavisi konsantrasyonunu (mg/L), C_t, belirlenen adsorpsiyon zamanı sonunda çözüldüde kalan metilen mavisi konsantrasyonunu (mg/L), V, adsorpsiyon işleminde kullanılan metilen mavisi çözeltisi hacmini (L), q_t, belirlenen adsorpsiyon süresi sonunda birim adsorban kütlesi başına giderilen metilen mavisi miktarını (mg/g), M ise kullanılan adsorban miktarını (g) ifade etmektedir.

2.4. Adsorpsiyon Kinetik Modelleri

Çalışmada elde edilen 3 farklı aktif karbon ile ayrı ayrı kinetik modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, 50 mg/L metilen mavisi konsantrasyonuna sahip çözelti ile 250 mg aktif karbon 500 mL'lik erlen içerisinde biraraya getirilerek kinetik çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kesikli reaktör prensibinde gerçekleştirilen işlem, çalkalayıcı içerisinde 250 dev/dak karıştırma hızında 60 dakika boyunca 10'ar dakika ara ile numune alınarak uygulanmıştır. Elde edilen datalar Elovich, Yalancı Birinci Dereceden, Yalancı İkinci Dereceden (Tip 1) ve Partikül İçi Difüzyon kinetik modellerinde uygulanmıştır. Kinetik modellerine ait doğrusal (lineer) ifadeler Çizelge 3'te verilmiştir [27-31].

Çizelge 3. Çalışmada kullanılan kinetik modellere ait bilgiler

Kinetik modeli	Lineer denklem	Eksenler (Y,X)	Parametreler
Elovich	$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta} \ln t$	$q_t, \ln t$	β, α
Yalancı Birinci Derece	$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t$	$\ln(q_e - q_t), t$	q_e, k_1
Yalancı İkinci Derece (Tip 1)	$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$	$\frac{1}{q_t}, t$	q_e, k_2
Partikül İçi Difüzyon	$q_t = k_p \sqrt{t} + C$	q_t, \sqrt{t}	k_p

2.5. Adsorpsiyon İzoterm Modelleri

Çalışmada elde edilen 3 farklı aktif karbonla ayrı ayrı izoterm çalışmaları gerçekleştirilmiştir. İzoterm çalışmaları farklı metilen mavisi başlangıç konsantrasyonlarında sabit aktif karbon kütlesi ile uygulanmıştır. Başlangıç konsantrasyonları Çizelge 2’de verilmiştir. Kullanılan aktif karbon kütlesi 50 mg olarak seçilmiştir. Adsorpsiyon çalışmaları 50 mL çözelti hacminde, 250 dev/dak karıştırma hızında, çalkalayıcı içerisinde yapılmıştır. Elde edilen datarlar, Freundlich, Langmuir (Tip 1), Temkin ve Dubinin-Radushkevich izoterm modellerine uygulanmıştır. Modellere ait doğrusal (lineer) ifadeler Çizelge 4’te verilmiştir [31,32].

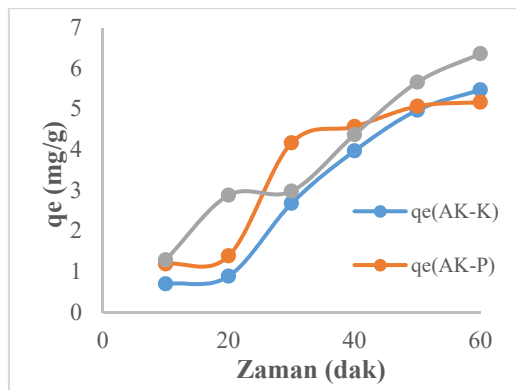
Çizelge 4. Çalışmada kullanılan izoterm modellerine ait bilgiler

İzoterm modeli	Lineer denklem	Eksenler (Y,X)	Parametreler
Freundlich	$\ln q_e = \ln K_f + \frac{1}{n} \ln C_e$	$\ln q_e, \ln C_e$	K_f, n
Langmuir (Tip1)	$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{max} K_L} + \frac{C_e}{q_{max}}$	$\frac{C_e}{q_e}, C_e$	q_e, K_L
Temkin	$q_e = \frac{RT}{A_T} \ln K_T + \frac{RT}{A_T} \ln C_e$	$q_e, \ln C_e$	q_e, K_T
Dubinin-Radushkevich	$\ln q_e = \ln q_m - \beta \varepsilon^2$	$\ln q_e, \varepsilon^2$	q_m, β

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. Hidrolik Bekletme Süresinin Adsorpsiyon Performansına Etkisi

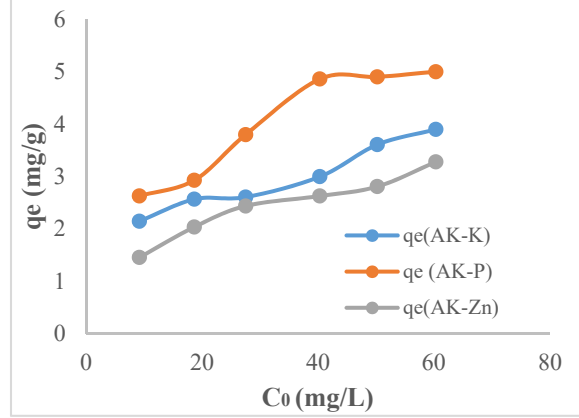
AK-K, AK-Zn, AK-P aktif karbonları ile 10, 20, 30, 40, 50 ve 60 dakikalık hidrolik bekletme sürelerinde elde edilen metilen mavisi adsorpsiyon kapasiteleri Şekil 2’deki grafikte gösterilmiştir.

**Şekil 2.** Hidrolik bekletme süresinin adsorpsiyon kapasitesine etkisi

Yapılan çalışmalar sonucunda AK-P aktif karbonunun adsorpsiyon kapasitesinin 50. dakikadan itibaren önemli bir değişikliğe uğramadığı görülmektedir. Belirlenen süre sonunda en yüksek adsorpsiyon kapasitesine AK-Zn aktif karbonunun ulaştığı belirlenmiştir. 60 dakika sonunda AK-K, AK-P ve AK-Zn aktif karbonlarının adsorpsiyon kapasiteleri sırasıyla 5,47 mg/g, 5,17 mg/g ve 6,36 mg/g olarak hesaplanmıştır.

3.2. Başlangıç Metilen Mavisi Konsantrasyonunun Aktif Karbon Adsorpsiyon Kapasitesine Etkisi

Sentezlenen 3 ayrı aktif karbon 6 farklı başlangıç konsantrasyonuna sahip metilen mavisi çözeltileri ile ayrı ayrı adsorpsiyon işlemine tabi tutulmuşlardır. Çalışma sonunda elde edilen sonuçlar Şekil 3'teki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 3. Başlangıç konsantrasyonunun adsorpsiyon kapasitesine etkisi

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde başlangıç konsantrasyonu arttıkça üç aktif karbonun da adsorpsiyon verimlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, artan boya konsantrasyonunun yarattığı konsantrasyon gradyanının kütle transferine olan direnci, yaratılan itme kuvvetiyle azaltarak adsorpsiyon kapasitesinde artışa neden olmasıdır [33]. En yüksek adsorpsiyon kapasitesi AK-P ile 5 mg/g olarak sağlanırken, AK-K ve AK-Zn aktif karbonları ile de sırasıyla 3,90 mg/g ve 3,28 mg/g adsorpsiyon kapasitesi değerleri elde edilmiştir. 50 mg/L başlangıç konsantrasyonundan itibaren adsorpsiyon kapasitesindeki artış oranında azalma başladığı görülmektedir. Pua ve arkadaşları metilen mavisi adsorpsiyonu üzerine gerçekleştirdikleri çalışmada, metilen mavisinin başlangıç konsantrasyonunun artması ile boya moleküllerinin birleşme eğiliminin arttığını ve bu durumun adsorpsiyon mekanizmasını olumsuz etkilediğini bildirmişlerdir [34].

3.3. Adsorpsiyon Kinetik Modelleri

KOH, ZnCl₂ ve H₃PO₄ kimyasalları ile aktive edilmiş aktif karbonlara ait kinetik çalışmalarının verileri sırasıyla Çizelge 5, Çizelge 6 ve Çizelge 7'de verilmiştir. Kinetik çalışması verileri Elovich, Yalancı Birinci Derece, Yalancı İkinci Derece ve Partikül İçi Difüzyon kinetik modellerine uygulanmıştır. Kinetik modellerinden elde edilen doğru denklemleri ile tahmin edilen adsorpsiyon kapasitesi değerleri bulunarak ortalama bağıl hata değerleri hesaplanarak hangi kinetik modelin adsorpsiyonu daha iyi açıkladığı belirlenmiştir. Kinetik modellerin uygunluğu belirlenirken en düşük ortalama bağıl hata değerinin en iyi sonucu verdiği dikkate alınarak değerlendirme yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde KOH aktivasyonu ile gerçekleştirilen kinetik çalışmalarının Yalancı İkinci Derece kinetik modeliyle daha uyumlu olduğu belirlenmiştir. Literatürde gerçekleştirilen çalışmalarda 20 mg/L ile 100 mg/L başlangıç konsantrasyonuna sahip Cr(VI), benzen, metil oranj, Cu(II), resorcinol, metilen mavisi gibi kirleticilerin giderimlerinde Yalancı İkinci Dereceden (Tip 1) kinetik modelinin proseslere uygunluk gösterdiği belirtilmiştir. Elde edilen sonucun literatürü desteklediği görülmüştür [35-39]. Ayrıca Yalancı İkinci Dereceden kinetik modeli aktif karbonun yüzeyinde bol miktarda aktif bölgenin varlığını işaret etmektedir. Literatürde gerçekleştirilen bir çalışmada, biyokömür ile aynı biyokömürün modifiye edilmiş halinin Pb (II) adsorpsiyonu araştırılmıştır ve modifiye edilmiş biyokömürün Yalancı İkinci Dereceden kinetik modeliyle uyumlu bir adsorpsiyon gerçekleştirdiği belirtilmiştir [40]. Sanou ve arkadaşları yarfıstığı kabuklarından H₃PO₄ aktivasyonu ile aktif karbon sentezlemişlerdir ve elde edilen aktif karbon ile metilen mavisi adsorpsiyonu çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Yapılan kinetik model çalışmalarında metilen mavisi adsorpsiyonunu en iyi açıklayan modeli Yalancı İkinci Dereceden kinetik modeli olarak açıklamışlardır. Sanou ve arkadaşları, bu modelin hız sınırlayıcı basamağının kimyasal adsorpsiyon olduğunu ve metilen mavisi adsorpsiyonunun fizikokimyasal etkileşimlerle gerçekleştiğini bildirmişlerdir [41].

Çizelge 5. KOH aktivasyonu ile elde edilen aktif karbona ait kinetik çalışması verileri

Kinetik model	Doğru denklemi	R ²	Ortalama bağıl hata	Parametreler
Elovich	$y = 2,9066x - 6,7664$	0,90	39,60	$\beta = 2,91$ $\alpha = 0,03$
Yalancı Birinci Derece	$y = -0,0456x + 2,0583$	0,85	166,59	-
Yalancı İkinci Derece	$y = -0,1572x + 18,673$	0,38	20,72	-
Partikül İçi Difüzyon	$y = 1,1658x - 3,5419$	0,95	30,25	$k_p = 1,17$ $I = -3,54$

Çizelge 6. ZnCl₂ aktivasyonu ile elde edilen aktif karbona ait kinetik çalışması verileri

Kinetik model	Doğru denklemi	R ²	Ortalama bağıl hata	Parametreler
Elovich	$y = 2,7421x - 5,3957$	0,91	30,75	$\beta = 2,74$ $\alpha = 0,05$
Yalancı Birinci Derece	$y = -0,0397x + 2,0364$	0,87	62,13	-
Yalancı İkinci Derece	$y = 0,0378x + 7,3716$	0,37	30,75	-
Partikül İçi Difüzyon	$y = 1,0944x - 2,3231$	0,96	29,74	$k_p = 0,07$ $I = -2,32$

Çizelge 7. H₃PO₄ aktivasyonu ile elde edilen aktif karbona ait kinetik çalışması verileri

Kinetik model	Doğru denklemi	R ²	Ortalama bağıl hata	Parametreler
Elovich	$y = 2,576x - 5,1626$	0,88	30,31	$\beta = 2,58$ $\alpha = 0,05$
Yalancı Birinci Derece	$y = -0,0765x + 2,1661$	0,89	90,79	-
Yalancı İkinci Derece	$y = 0,0119x + 9,6145$	0,007	28,43	-
Partikül İçi Difüzyon	$y = 1,0046x - 2,1414$	0,88	28,25	$k_p = 1,00$ $I = -2,14$

Çizelge 6 ve Çizelge 7 incelendiğinde ZnCl₂ ve H₃PO₄ aktivasyonlarının Partikül İçi Difüzyon Modeli ile uyumlu bir adsorpsiyona neden olduğu görülmüştür. Partikül İçi Difüzyon kinetik modeli genellikle tasarım amaçlı adsorpsiyon mekanizmasını açıklar. Partikül içi difüzyonun adsorpsiyona karşı oluşturduğu direnci yorumlamak için de bu modele ait denklem kullanılmaktadır. Çizelge 3'te de belirtildiği gibi t^{0,5}'e karşı q_t değerleri ile elde edilen lineer grafikte eğim k_p değerini verirken, elde edilen doğrunun y eksenini kestiği nokta değeri I olarak adlandırılmaktadır [42]. Elde edilen k_p değeri (mg g⁻¹ min^{-1/2}) partikül içi difüzyon hız sabitini ifade ederken, I değeri ise sınır tabaka kalınlığını ifade etmektedir. I değeri büyüdükçe sınır tabakasının adsorpsiyona etkisi artmaktadır [43]. Buna göre, AK-Zn ve AK-P aktif karbonları kıyaslandığında, AK-P aktif karbonunun daha büyük I değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, AK-P aktif karbonunun metilen mavisi adsorpsiyonuna direnci AK-Zn aktif karbonuna göre daha yüksektir. AK-Zn aktif karbonu ile daha kısa sürede daha yüksek metilen mavisi giderimi beklenmektedir.

3.4. Adsorpsiyon İzoterm Modelleri

KOH, ZnCl₂ ve H₃PO₄ kimyasalları ile aktive edilmiş aktif karbonlara ait izoterm çalışması verileri sırasıyla Çizelge 8, Çizelge 9 ve Çizelge 10'da verilmiştir.

Çizelge 8. KOH aktivasyonu ile elde edilen aktif karbona ait izoterm çalışması verileri

İzoterm modeli	Doğru denklemi	R ²	Ortalama bağıl hata	Parametreler
Freundlich	$y = 0,273x + 0,1856$	0,90	6,00	n = 3,66 K _f = 1,20
Langmuir (Tip 1)	$y = 0,2242x + 2,7663$	0,94	10,15	q _m = 4,46 K _L = 0,08 R _L = 0,20
Temkin	$y = 0,7903x + 0,416$	0,85	7,39	-
Dubinin-Radushkevich	$y = -0,0414x + 1,1714$	0,57	11,94	-

Çizelge 9. ZnCl₂ aktivasyonu ile elde edilen aktif karbona ait izoterm çalışması verileri

İzoterm modeli	Doğru denklemi	R ²	Ortalama bağıl hata	Parametreler
Freundlich	$y = 0,3776x - 0,3726$	0,98	6,00	n = 2,65 K _f = 0,69
Langmuir (Tip 1)	$y = 0,2581x + 3,8127$	0,97	10,14	q _m = 3,87 K _L = 0,07 R _L = 0,23
Temkin	$y = 0,8337x - 0,2818$	0,97	24,75	-
Dubinin-Radushkevich	$y = -0,0767x + 1,0254$	0,88	26,99	-

Çizelge 10. H₃PO₄ aktivasyonu ile elde edilen aktif karbona ait izoterm çalışması verileri

İzoterm modeli	Doğru denklemi	R ²	Ortalama bağıl hata	Parametreler
Freundlich	$y = 0,3443x + 0,2582$	0,92	6,00	n = 2,90 K _f = 1,29
Langmuir (Tip 1)	$y = 0,1607x + 2,0713$	0,97	10,15	q _m = 6,22 K _L = 0,85 R _L = 0,02
Temkin	$y = 1,2767x - 0,0633$	0,90	25,70	-
Dubinin-Radushkevich	$y = -0,0477x + 1,4907$	0,63	25,10	-

Üç aktif karbona ait izoterm verileri incelendiğinde, bu aktif karbonlarla gerçekleştirilen adsorpsiyon işlemini en iyi açıklayan izoterm modelinin Freundlich izoterm modeli olduğu saptanmıştır.

Freundlich izotermi ampirik bir modeldir ve farklı enerjilere sahip adsorpsiyonların gerçekleştiği heterojen bir süreci tanımlamaktadır. Ayrıca Freundlich izotermi adsorpsiyon esnasında sınırsız sayıda tek katman oluşumunu ve tersinir adsorpsiyon mekanizmasının varlığını ifade etmektedir [32]. Freundlich izoterm modeli ile elde edilen n değeri, adsorpsiyonun fiziksel ya da kimyasal olarak gerçekleştiği hakkında bilgi vermektedir. N değeri 1'den küçük olduğunda fiziksel adsorpsiyonun, n değeri 1'den büyük olduğunda ise kimyasal adsorpsiyonun gerçekleştiği anlamına gelmektedir [44]. Çizelge 8, Çizelge 9 ve Çizelge 10 incelendiğinde üç aktif karbon ile gerçekleştirilen metilen mavisi giderimlerinin kimyasal adsorpsiyon ile gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Kimyasal adsorpsiyonun gerçekleştiği durumlarda Freundlich İzoterm Modeline uyum gösteren adsorpsiyon proseslerinde tek tabakalı adsorpsiyonun gerçekleştiği bildirilmektedir [45]. Dimbo ve arkadaşları H₃PO₄ aktivasyonu ile afrika lale ağacı saplarından aktif karbon eldesi gerçekleştirerek metilen mavisi adsorpsiyonu üzerine çalışma yapmışlardır. Elde ettikleri izoterm verileri ile metilen mavisi adsorpsiyonunun Freundlich izotermine uyumlu olarak gerçekleştiğini bildirmişlerdir. Freundlich izoterm modeline ait n ve K_f değerlerini sırasıyla 3 ve 28,43 Lg/L bulmuşlar ve adsorpsiyonun kimyasal olarak gerçekleştiğini bildirmişlerdir [46].

4. SONUÇLAR

KOH, $ZnCl_2$, H_3PO_4 kimyasalları kullanılarak atık zeytin çekirdeğinden 3 farklı aktif karbon eldesi gerçekleştirilmiştir. Bu aktif karbonlarla metilen mavisinin adsorpsiyon çalışmaları gerçekleştirilerek aktivasyon kimyasal türlerinin metilen mavisini giderim mekanizmalarına ve kimyasına etkileri incelenmiştir. Kinetik model çalışmalarında bekletme süresinin metilen mavisine giderimi etkileri de incelenmiştir. 60 dakikalık süre boyunca gerçekleştirilen çalışmada, en yüksek adsorpsiyon kapasitesinin nötr aktivasyon kimyasalı olan $ZnCl_2$ ile elde edilen AK-Zn aktif karbonu ile elde edildiği görülmüştür. AK-P aktif karbonu ise 40. dakikadan itibaren metilen mavisini adsorpsiyonu gerçekleştirilmemiştir. İzoterm çalışmaları için farklı başlangıç konsantrasyonlarında sabit aktif karbon kütleleri ile metilen mavisini adsorpsiyonu gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada ise, başlangıç konsantrasyonu arttıkça AK-P aktif karbonunun diğerlerine göre daha yüksek adsorpsiyon kapasitesine ulaştığı görülmüştür. Gerçekleştirilen kinetik çalışmalarında ise AK-K aktif karbonunun yalnızca ikinci dereceden kinetik modele uyumlu olarak adsorpsiyon yaptığı bunun sonucunda ise AK-K aktif karbonunun yüzeyinde bol miktarda aktif bölgenin olduğu anlaşılmıştır. AK-Zn ve AK-P aktif karbonları ise partikül içi difüzyon kinetik modeline uyumlu olarak adsorpsiyon gerçekleştirmişlerdir. Partikül içi difüzyon kinetik modeli çalışması yardımıyla AK-Zn ve AK-P aktif karbonlarının metilen mavisini adsorpsiyonuna gösterdikleri dirençler I değeri üzerinden kıyaslanmıştır. Daha yüksek I değerine sahip AK-P aktif karbonunun AK-Zn aktif karbonuna göre metilen mavisini adsorpsiyonuna karşı daha yüksek bir yüzey direncine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, AK-Zn aktif karbonunun AK-P aktif karbonuna göre daha kısa sürelerde daha verimli metilen mavisini adsorpsiyonu gerçekleştirmesi beklenmektedir. İzoterm çalışmalarında ise üç aktif karbonun tamamının Freundlich izotermine uyumlu olarak adsorpsiyon gerçekleştirdiği görülmüştür. Buna bağlı olarak üç aktif karbonla da gerçekleştirilen adsorpsiyon işleminin kimyasal ve tersinir olarak gerçekleştiği belirlenmiştir. Aynı zamanda aktif karbon yüzeylerinde tek tabakalı adsorpsiyon gerçekleştiği sonucuna varılmıştır. Çalışma sonuçları incelendiğinde yüksek metilen mavisini konsantrasyonlarında H_3PO_4 ile aktive edilmiş aktif karbonların kullanılmaması önerilmektedir. İzoterm ve kinetik modelleri çalışma verileri ele alındığında ise KOH ve $ZnCl_2$, metilen mavisini adsorpsiyonunda kullanılacak aktif karbonların sentezinde uygun kimyasallar olarak öne çıkmaktadır.

5. KAYNAKLAR

1. Weng, C.H. & Pan, Y.F. (2007). Adsorption of a cationic dye (methylene blue) onto spent activated clay. *Journal of Hazardous Materials*, 144(1), 355-362.
2. El Qada, E.N., Allen, S.J. & Walker, G.M. (2006). Adsorption of Methylene Blue onto activated carbon produced from steam activated bituminous coal: A study of equilibrium adsorption isotherm. *Chemical Engineering Journal*, 124(1), 103-110.
3. Senthilkumar, S., Varadarajan, P.R., Porkodi, K. & Subbhuraam, C.V. (2005). Adsorption of methylene blue onto jute fiber carbon: kinetics and equilibrium studies. *Journal of Colloid and Interface Science*, 284(1), 78-82.
4. Li, W., Mu, B. & Yang, Y. (2019). Feasibility of industrial-scale treatment of dye wastewater via bio-adsorption technology. *Bioresour. Technol.*, 277, 157-170.
5. Maiti, D., Mukhopadhyay, S. & Devi, P.S. (2017). Evaluation of mechanism on selective, rapid, and superior adsorption of congo red by reusable mesoporous α - Fe_2O_3 nanorods. *ACS Sustainable Chemical Engineering*, 5(12), 11255-67.
6. Sharma, V., Vinoth Kumar, R., Pakshirajan, K. & Pugazhenti, G. (2017). Integrated adsorption-membrane filtration process for antibiotic removal from aqueous solution. *Powder Technology*, 321, 259-269.
7. Bestani, B., Benderdouche, N., Benstaali, B., Belhakem, M. & Addou, A. (2008). Methylene blue and iodine adsorption onto an activated desert plant. *Bioresour. Technol.*, 99(17), 8441-4.
8. Ahmad, A.L., Loh, M.M. & Aziz, J.A. (2007). Preparation and characterization of activated carbon from oil palm wood and its evaluation on Methylene blue adsorption. *Dyes and Pigments*, 75(2), 263-272.
9. Arulkumar, M., Sathishkumar, P. & Palvannan, T. (2011). Optimization of Orange G dye adsorption by activated carbon of *Thespesia populnea* pods using response surface methodology. *Journal of Hazardous Materials*, 186(1), 827-834.
10. Wang, J. & Wang, S. (2016). Removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) from wastewater: A review. *Journal of Environmental Management*, 182, 620-640.

11. Vargas, A.M.M., Cazetta, A.L., Kunita, M.H., Silva, T.L. & Almeida, V.C. (2011). Adsorption of methylene blue on activated carbon produced from flamboyant pods (*Delonix regia*): Study of adsorption isotherms and kinetic models. *Chemical Engineering Journal*, 168(2), 722-730.
12. Ayinla, R.T., Dennis, J.O., Zaid, H.M., Sanusi, Y.K., Usman, F. & Adebayo, L.L. (2019). A review of technical advances of recent palm bio-waste conversion to activated carbon for energy storage. *Journal of Cleaner Production*, 229, 1427-1442.
13. Kleszyk, P., Ratajczak, P., Skowron, P., Jagiello, J., Abbas, Q. & Frąckowiak, E. (2015). Carbons with narrow pore size distribution prepared by simultaneous carbonization and self-activation of tobacco stems and their application to supercapacitors. *Carbon*, 81, 148-157.
14. Gao, Y., Yue, Q., Gao, B. & Li, A. (2020). Insight into activated carbon from different kinds of chemical activating agents: A review. *Science of The Total Environment*, 746, 141094.
15. Gil, R., Ruiz, B., Lozano, M. & Fuente, E. (2014). Influence of the pyrolysis step and the tanning process on KOH-activated carbons from biocollagenic wastes. Prospects as adsorbent for CO₂ capture. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 110, 194-204.
16. Nowicki, P., Kazmierczak, J. & Pietrzak, R. (2015). Comparison of physicochemical and sorption properties of activated carbons prepared by physical and chemical activation of cherry stones. *Powder technology*, 269, 312-319.
17. Mousazadeh, B., Mohammadi, N. & Khosravi-Nikou, M.R. (2024). Synthesis and characterization of porous activated carbons derived from lotus nut and their performance for CO₂ adsorption. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(6), 5379-5394.
18. Tounsadi, H., Khalidi, A., Abdennouri, M. & Barka, N. (2016). Activated carbon from *Diplotaxis Harra* biomass: Optimization of preparation conditions and heavy metal removal. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 59, 348-358.
19. Chiu, Y.H. & Lin, L.Y. (2019). Effect of activating agents for producing activated carbon using a facile one-step synthesis with waste coffee grounds for symmetric supercapacitors. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 101, 177-185.
20. Mojoudi, N., Soleimani, M., Mirghaffari, N., Belver, C. & Bedia, J. (2019). Removal of phenol and phosphate from aqueous solutions using activated carbons prepared from oily sludge through physical and chemical activation. *Water Science and Technology*, 80(3), 575-586.
21. Xi, Y., Yang, D., Qiu, X., Wang, H., Huang, J. & Li, Q. (2018). Renewable lignin-based carbon with a remarkable electrochemical performance from potassium compound activation. *Industrial Crops and Products*, 124, 747-754.
22. Hapiz, A., Jawad, A.H., Wilson, L.D. & ALOthman, Z.A. (2024). High surface area activated carbon from a pineapple (*Ananas comosus*) crown via microwave-ZnCl₂ activation for crystal violet and methylene blue dye removal: adsorption optimization and mechanism. *International Journal of Phytoremediation*, 26(3), 324-338.
23. Yaacoubi, F.E., Sekkouri, C., Ennaciri, K., Rabichi, I., Izghri, Z. & Baçaoui, A. (2024). Synthesis of composites from activated carbon based on olive stones and sodium alginate for the removal of methylene blue. *International Journal of Biological Macromolecules*, 254, 127706.
24. Hashem, H.M., El-Maghrabey, M. & El-Shaheny, R. (2024). Inclusive study of peanut shells derived activated carbon as an adsorbent for removal of lead and methylene blue from water. *Scientific Reports*, 14(1), 13515.
25. Dalmaz, A. & Sivrikaya Özak, S. (2024). Methylene blue dye efficient removal using activated carbon developed from waste cigarette butts: Adsorption, thermodynamic and kinetics. *Fuel*, 372, 132151.
26. Hameed, B.H., Din, A.T.M. & Ahmad, A.L. (2007). Adsorption of methylene blue onto bamboo-based activated carbon: Kinetics and equilibrium studies. *Journal of Hazardous Materials*, 141(3), 819-825.
27. Nandi, B.K., Goswami, A. & Purkait, M.K. (2009). Removal of cationic dyes from aqueous solutions by kaolin: Kinetic and equilibrium studies. *Applied Clay Science*, 42(3), 583-590.
28. Xia, F., Ou, E., Wang, L. & Wang, J. (2008). Photocatalytic degradation of dyes over cobalt doped mesoporous SBA-15 under sunlight. *Dyes and Pigments*, 76(1), 76-81.
29. Amin, N.K. (2009). Removal of direct blue-106 dye from aqueous solution using new activated carbons developed from pomegranate peel: Adsorption equilibrium and kinetics. *Journal of Hazardous Materials*, 165(1), 52-62.
30. Ho, Y.S., Chiang, T.H. & Hsueh, Y.M. (2005). Removal of basic dye from aqueous solution using tree fern as a biosorbent. *Process Biochemistry*, 40(1), 119-124.
31. Kayranli, B. (2011). Adsorption of textile dyes onto iron based waterworks sludge from aqueous solution; isotherm, kinetic and thermodynamic study. *Chemical Engineering Journal*, 173(3), 782-791.

32. Freundlich, H. (1907). Über die Adsorption in Lösungen. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 57U(1), 385-470.
33. Abbas, M. & Trari, M. (2020). Removal of methylene blue in aqueous solution by economic adsorbent derived from apricot stone activated carbon. *Fibers Polymers*, 21(4), 810-820.
34. Pua, F., Sajab, M.S., Chia, C.H., Zakaria, S., Rahman, I.A. & Salit, M.S. (2013). Alkaline-treated cocoa pod husk as adsorbent for removing methylene blue from aqueous solutions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1(3), 460-465.
35. Agarwal, S. & Rani, A. (2017). Adsorption of resorcinol from aqueous solution onto CTAB/NaOH/flyash composites: Equilibrium, kinetics and thermodynamics. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(1), 526-538.
36. Darwish, A.A.A., Rashad, M. & AL-Aoh, H.A. (2019). Methyl orange adsorption comparison on nanoparticles: Isotherm, kinetics, and thermodynamic studies. *Dyes and Pigments*, 160, 563-571.
37. Khan, S.U., Islam, D.T., Farooqi, I.H., Ayub, S. & Basheer, F. (2019). Hexavalent chromium removal in an electrocoagulation column reactor: Process optimization using CCD, adsorption kinetics and pH modulated sludge formation. *Process Safety and Environmental Protection*, 122, 118-130.
38. Stähelin, P.M., Valério, A., Guelli Ulson de Souza, S.M. de A, da Silva, A., Borges Valle, J.A. & Ulson de Souza, A.A. (2018). Benzene and toluene removal from synthetic automotive gasoline by mono and bicomponent adsorption process. *Fuel*, 231, 45-52.
39. Gunasundari, E. (2017). Adsorption isotherm, kinetics and thermodynamic analysis of Cu(II) ions onto the dried algal biomass (*Spirulina platensis*). *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 56, 129-144.
40. Xia, Y., Yang, T., Zhu, N., Li, D., Chen, Z. & Lang, Q.(2019). Enhanced adsorption of Pb(II) onto modified hydrochar: Modeling and mechanism analysis. *Bioresource Technology*, 288, 121593.
41. Sanou, I., Bamogo, H., Sanou, A., Ouedraogo, M., Saadi, L. & Waqif, M. (2024). Adsorption of methylene blue in aqueous medium by activated carbon from peanut shells. *Chemistry Africa*, 7(5), 2777-2794.
42. Weber, W.J. & Morris, J.C. (1963). Kinetics of adsorption on carbon from solution. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, 89(2), 31-59.
43. Vimonses, V., Lei, S., Jin, B., Chow, C.W.K. & Saint, C. (2009). Kinetic study and equilibrium isotherm analysis of Congo Red adsorption by clay materials. *Chemical Engineering Journal*, 148(2), 354-364.
44. Wu, C.H. (2007). Adsorption of reactive dye onto carbon nanotubes: Equilibrium, kinetics and thermodynamics. *Journal of Hazardous Materials*, 144(1), 93-100.
45. Chen, X., Hossain, M.F., Duan, C., Lu, J., Tsang, Y.F. & Islam, M.S. (2022). Isotherm models for adsorption of heavy metals from water - A review. *Chemosphere*, 307, 135545.
46. Dimbo, D., Abewaa, M., Adino, E., Mengistu, A., Takele, T. & Oro, A. (2024). Methylene blue adsorption from aqueous solution using activated carbon of *spathodea campanulata*. *Results in Engineering*, 21, 101910.



Development of a Material Selection Software for DC-DC Converters Using Python

Oğuzhan TİMUR^{1,a}

¹Cukurova University, Department of Electrical & Electronics Engineering, Adana, Türkiye

^aORCID: 0000-0002-6537-7840

Article Info

Received : 17.02.2025

Accepted : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665947

Corresponding Author

Oğuzhan TİMUR

otimur@cu.edu.tr

Keywords

DC-DC converters

Software

Material selection

PI controller

How to cite: TİMUR, O., (2025).

Development of a Material Selection Software for DC-DC Converters Using Python. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(1), 153-170.

ABSTRACT

DC-DC converters are one of the crucial tools of power electronics. Choosing the right materials while designing converters is essential to obtaining the right results. When selecting these components, the requirements of the intended application and the type of DC-DC converter that is to be used should be considered, and appropriate calculations should be carried out accordingly. Components should then be selected based on these calculations. These calculations differ with the requirements of the application and the type of the converter. These calculation tools are rare in market except for commercial material manufacturers. In this study, a Python-based software has been developed to fulfill this task. This software is designed to be used by individuals of all levels of knowledge. It is thought that it will provide great convenience in material selection for undergraduate and graduate students and engineers who design electronic cards.

Python Kullanılarak DC-DC Dönüştürücüler İçin Malzeme Seçim Yazılımının Geliştirilmesi

Makale Bilgileri

Geliş : 17.02.2025

Kabul : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665947

Sorumlu Yazar

Oğuzhan TİMUR

otimur@cu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

DC-DC dönüştürücüler

PI kontrolcü

Malzeme seçimi

Yazılım

Atıf şekli: TİMUR, O., (2025). Python

Kullanılarak DC-DC Dönüştürücüler İçin Malzeme Seçim Yazılımının Geliştirilmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(1), 153-170.

ÖZ

DC-DC dönüştürücüler güç elektroniğinin vazgeçilmez araçlarıdır. Dönüştürücü tasarımında doğru malzemelerin seçimi, doğru sonuçların elde edilmesi açısından önemlidir. Malzemeleri seçerken, kullanılacağı uygulamanın gereksinimlerine ve hangi DC-DC dönüştürücü kullanılacağına bakılarak ona uygun olan hesaplamalar yapılmalıdır. Yapılan bu hesaplamalara göre seçim yapılmalıdır. Hesaplamalar uygulamanın gereksinimine ve dönüştürücünün çeşidine göre farklılıklar gösterir. Piyasada bu hesaplamaları yapmak için geliştirilen, ticari yazılımlar dışında çok az sayıda yazılım bulunmaktadır. Bu çalışmada bu görevi gerçekleştirmek üzere Python tabanlı bir yazılım geliştirilmiştir. Geliştirilen yazılım her bilgi düzeyinden kişiler tarafından kullanılabilir şekilde tasarlanmıştır. Elektronik kart tasarımı yapan lisans, lisansüstü öğrenciler ve mühendisler için malzeme seçiminde büyük kolaylık sağlayacağı düşünülmektedir.

1. INTRODUCTION

Power supply technology provides the opportunity to us to build and operate electronic circuits and systems. Every electronic circuit needs a dc power supply to run. These circuits require different voltage levels. The dc voltage is usually derived from batteries or ac power supplies by using transformers, rectifiers and filters. This raw dc voltage has high ac ripple that is not appropriate to feed electronic circuits. In some cases, this voltage carries the harmonics from unfiltered ac power supply. These unwanted effects can significantly affect the performance of electronic systems, causing malfunctions and inefficiencies. To ensure the quality of dc voltage, DC-DC converters are obligated to use. DC-DC converters do not provide just more stable voltage, they also provide flexibility to change voltage level according to requirements of the electronic systems. By regulating and converting DC voltage efficiently, DC-DC converters help optimize power usage and improve the overall efficiency of electronic devices [1].

For different kind of applications, a vast variety of DC-DC converters have been developed. This article has been written with the intention of it to become a hand guide and a useful application to the ones that work with or will work with DC-DC converters. This article presents a detailed study for seven widely used DC-DC converters: buck, boost, buck-boost, cuk, flyback, forward and push-pull have been selected for this research. These converters have been selected due to their prevalence in various industrial and consumer electronics applications. This work stands out by combining theoretical analysis with a Python-based application. Both theoretical analysis and application show how components of DC-DC converters should have been selected. The parameters of components that should be taken note of are inductance and capacitance values, and voltage and current ratings of switches and diodes [2-4].

DC-DC converters operate in three distinct modes depending on inductor current: Continuous Conduction Mode (CCM), Boundary Conduction Mode (BCM) and Discontinuous Conduction Mode (DCM). In this article, analysis and derivation of the dc voltage transfer functions of DC-DC converters have been done in BCM. Additionally, the derivation of the theoretical equations in the article was also carried out in BCM. However, the developed software is able to calculate the required values for three different modes of DC-DC converters. [1,5-6].

In order to complete the theoretical framework, a computer application has been developed for this article. When the developed software is compared with its commercial equivalents, it is seen that it is designed for the materials that commercial brands produce themselves. Developed application is designed to be brand independent. It is developed to assist engineers, researchers, and students in calculating key parameters, such as inductance, capacitance, voltage and current values of the components of the seven DC-DC converters that have been dwelled upon in this article. The software is designed for universal accessibility, featuring a simple and user-friendly interface. At the top of the interface, users can select their desired DC-DC converter type from the tabs. Then, they input the required parameters for their specific application, such as input voltage, output voltage, switching frequency, and transformer turn ratio. Next, they choose the operating mode for their DC-DC converter. Once all parameters are set, clicking the "Calculate" button generates the necessary component values. Users also have the option to print the calculated values or save them as a TXT file directly through the software.

Developed using Python in this software, Tkinter library has been used to develop user interface. The application uses a tabbed interface structure where each DC-DC converter topology has its dedicated tab. The main components are a notebook widget for tab management, circuit diagram display using canvas, input fields, mode selection using radio buttons, and calculation results display. The application is packaged into a standalone executable using PyInstaller, making it easily distributable to end users. The distribution package includes the main executable file and images of circuit diagrams [7-10].

This article aims to bridge the gap between theoretical analysis and practical application by providing a comprehensive guide to DC-DC converters and an accompanying software tool for convenient calculations. With the continuous evolution of electronic systems and the increasing demand for efficient power conversion solutions, the insights and resources presented in this research will be a crucial data for the ones that related to power electronics. Calculations have been made in detail for all converters given in the tabs in all modes separately. However, instead of sampling all the forms made in the developed application, examples that are different from each other are given.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Buck Converter

A DC-DC buck converter, as shown in Figure 1 below, is used to produce lower value output voltage from higher value input voltage. There are various applications that buck converter used in, for example, battery operated portable devices, power supplies to laptops, smart phones, power supply network in data centers and electric vehicles. In some applications where the polarity of output voltage needed to be negative, thus the polarity of the input voltage should be negative. Regardless of the comparison between the polarity of input and output voltages, the output voltage polarity will always be same as input voltage [6,11,12].

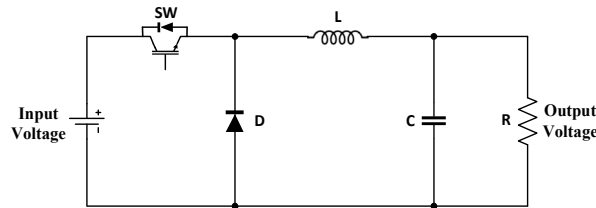


Figure 1. Buck converter circuit

Buck converter can be observed in two states as switch on and switch off as shown in Figure 2. When the switch is on it acts as a short circuit and diode is reverse biased and acts as an open circuit. In this state, input directly supplies energy to the output and inductor. When the switch is off it acts as an open circuit and diode is forward biased and acts as a short circuit. In this state, input has no connection to the output nor inductor and the inductor supplies energy to the output. According to switch on and off states, inductor current is obtained as shown in Figure 3. By using this graph, all desired equations can be calculated [1], [13-14]. The derivations and calculations of buck converter are shown in Equations (1-23).

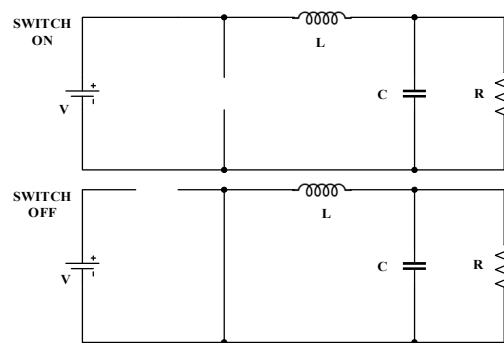


Figure 2. Buck converter ON/OFF states

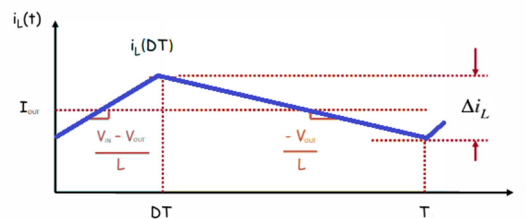


Figure 3. Inductor current graph of buck converter in CCM

Switch is **ON STATE**:

$$V_L = V_{in} - V_{out} \quad (1)$$

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} \quad (2)$$

$$\frac{(V_{in} - V_{out})}{L} DT = \Delta i_L \quad (3)$$

Switch is **OFF STATE**:

$$V_L = V_{out} \quad (4)$$

$$\frac{V_{out}}{L}(1-D)T = \Delta i_L \quad (5)$$

$$\frac{V_{out}}{L}(1-D)T = \frac{(V_{in}-V_{out})}{L}DT \quad (6)$$

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (7)$$

If buck converter works in BCM, inductor value should be like this:

$$I_{out} = \frac{\Delta i_L}{2} \quad (8)$$

$$L = \frac{(V_{in}-V_{out})DT}{2I_{out}} = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (9)$$

Capacitor should be selected according to output voltage ripple sensitivity:

$$C = \frac{V_{in}D(1-D)T^2}{8L\Delta V_{out}} = \frac{1-D}{8Lf^2(\Delta V_{out}/V_{out})} \quad (10)$$

Switch and diode parameters are:

$$I_{L(max)} = I_{out} + \frac{\Delta i_L}{2} \text{ and } V_{SW} = V_{in}, I_{SW} = I_{L(max)}, V_D = V_{in}, I_D = I_{L(max)} \quad (11)$$

Since buck converter has a wide range of applications, its control is extremely important. The output voltage must remain constant even if the input voltage increases or decreases. There are two control types as open loop control and closed loop control. Closed-loop control is preferred to obtain more accuracy and precision. Generally, one of the P, PI, PID control methods is used in power electronics applications. When setting up control circuits, the transfer function of the relevant circuits must be calculated firstly. Calculation steps of a transfer function are given below between Equation 12 and 16.

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{V_{in}(t)-V_{out}(t)}{L} \quad (12)$$

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{di_C(t)}{dt} + \frac{di_R(t)}{dt} \quad (13)$$

$$\frac{V_{in}(s)-V_{out}(s)}{L} = s^2CV_{out}(t) + sCV_{out}(0) + CV'_{out}(0) + \frac{sV_{out}(s)}{R} \quad (14)$$

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{1}{s^2LC + \frac{L}{R}s + 1} \quad (15)$$

$$T(s) = \frac{L(s)}{1+L(s)} = \frac{\left(\frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s}\right) \left(\frac{V_{in}}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1}\right)}{1 + \left(\frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s}\right) \left(\frac{V_{in}}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1}\right)} = \frac{\frac{V_{in}K_d s^2 + V_{in}K_p s + V_{in}K_i}{LC}}{s^3 + \left(\frac{1}{RC} + \frac{V_{in}K_d}{LC}\right)s^2 + \left(\frac{1}{LC} + \frac{V_{in}K_p}{LC}\right)s + \frac{V_{in}K_i}{LC}} \quad (16)$$

After the calculation of transfer function, K_p , K_i and K_d parameters should be determined. Calculation steps are given between Equation 17 and Equation 23.

$$s^3 + 2\zeta\omega_n s^2 + \omega_n^2 s + \omega_n^3 = 0 \quad (17)$$

$$\frac{1}{RC} + \frac{V_{in}}{LC}K_d = 2\zeta\omega_n \quad (18)$$

$$\frac{1}{LC} + \frac{V_{in}}{LC} K_p = \omega_n^2 \tag{19}$$

$$\frac{V_{in}}{LC} K_i = \omega_n^3 \tag{20}$$

$$K_d = \frac{LC}{V_{in}} \left(2\zeta\omega_n - \frac{1}{RC} \right) \tag{21}$$

$$K_p = \frac{LC}{V_{in}} \left(\omega_n^2 - \frac{1}{LC} \right) \tag{22}$$

$$K_i = \frac{LC}{V_{in}} \omega_n^3 \tag{23}$$

According to PID parameters and duty cycle, the gate terminal of Buck converter’s switch can be triggered. The block diagram of the closed loop control for Buck converter is shown in Figure 4.

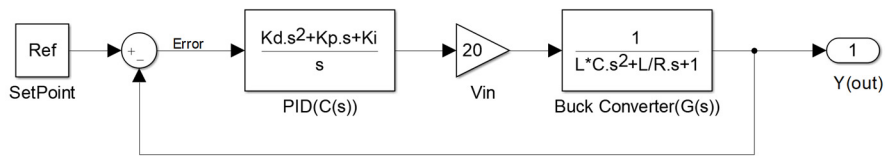


Figure 4. Block diagram of closed loop control

2.2. Boost Converter

DC-DC boost converter, as shown in Figure 5 below, is a step-up converter that means output voltage is always greater than input voltage, and the polarity of input and output voltages are always the same. It is generally used in regulated dc power supplies and regenerative braking systems [4-5], [13].

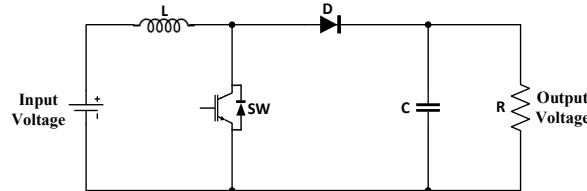


Figure 5. Boost converter circuit

A DC-DC Boost converter can be reviewed in two states as switch on and switch off states as shown in Figure 6 such as a Buck converter.

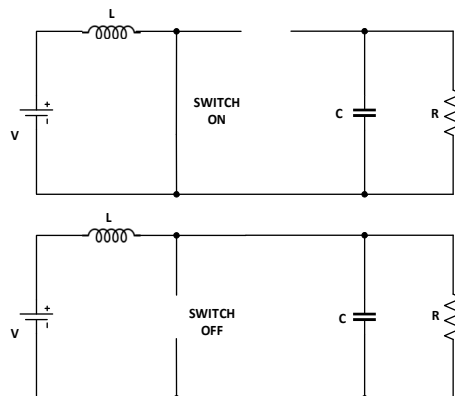


Figure 6. Boost converter states

When the switch is on state that makes it short circuit and diode is reverse biased that makes it open circuit. In this state output is isolated and input supplies energy to the inductor. The current supplied to output is discontinuous and the filter capacitor must supply dc current to output when diode is off state. When the switch is on state that makes it open circuit and the diode is forward biased that makes it short circuit. In

this state output is fed from inductor as well as from input. In the meantime, the filter capacitor is charging [13,14]. The derivations and calculations of boost converter are shown in Equations (24-34).

Switch is **ON STATE**

$$V_L = V_{in} \quad (24)$$

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} \quad (25)$$

$$\frac{V_{in}}{L} DT = \Delta i_L \quad (26)$$

Switch is **OFF STATE**

$$V_L = V_{in} - V_{out} \quad (27)$$

$$\frac{(V_{in} - V_{out})}{L} (1 - DT) = \Delta i_L \quad (28)$$

$$\frac{(V_{in} - V_{out})}{L} (1 - DT) = \frac{V_{in}}{L} DT \quad (29)$$

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} \quad (30)$$

If boost converter works in BCM, inductor value should be like this:

$$I_L = \frac{V_{in}}{(1-D)^2 R} = \frac{\Delta i_L}{2} \quad (31)$$

$$L = \frac{V_{in} DT}{2 I_L} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad (32)$$

Capacitor should be selected according to output voltage ripple sensitivity:

$$C = \frac{V_{out} DT}{R \Delta V_{out}} = \frac{D}{Rf(\Delta V_{out}/V_{out})} \quad (33)$$

Switch and diode parameters are:

$$I_{L(max)} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \text{ and } V_{SW} = V_{out}, I_{SW} = I_{L(max)}, V_D = V_{out}, I_D = I_{L(max)} \quad (34)$$

2.3. Buck-Boost Converter

Buck-boost converter, in another words step-down/step-up converter can give an output voltage that can be either higher or lower than input voltage. Its main applications are regulated power supplies where a negative-polarity output voltage may be desired. The buck-boost converter can be obtained by cascade connection of step-down (buck) converter and step-up (boost) converter, in a condition that the switches of both converters have same duty ratio. The cascade connection can be obtained into a single buck-boost converter that is shown in Figure 7 [13].

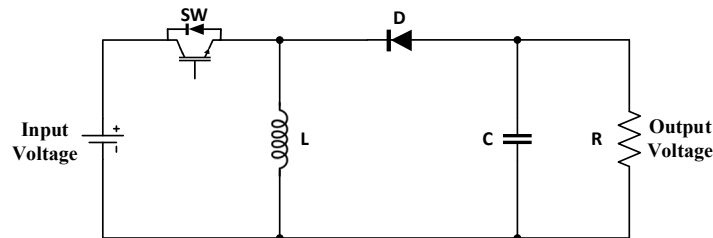


Figure 7. Buck-Boost converter circuit

Buck-boost converter can be analyzed in two states: switch on and switch off that is shown in Figure 8. In switch on state switch acts as short circuit and diode is reversed biased and acts as open circuit. In this state, input provides energy to the inductor. In switch off state switch acts as an open circuit and diode is forward biased and acts as short circuit. In this state, the inductor provides energy to the output and the output voltage will be negative when the ground is reference point [13-14]. The derivations and calculations of buck-boost converter is shown in Equations (35-45).

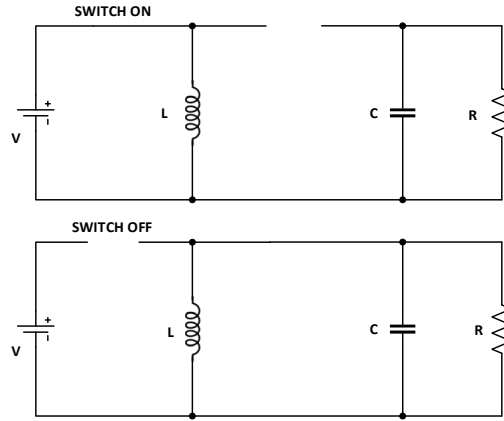


Figure 8. Buck-Boost converter states

Switch is **ON STATE**

$$V_L = V_{in} \tag{35}$$

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} \tag{36}$$

$$\frac{V_{in}}{L} DT = \Delta i_L \tag{37}$$

Switch is **OFF STATE**

$$V_L = -V_{out} \tag{38}$$

$$\frac{-V_{out}}{L} (1 - D)T = \Delta i_L \tag{39}$$

$$\frac{V_{in}}{L} DT = \frac{-V_{out}}{L} (1 - D)T \tag{40}$$

$$D = \frac{V_{out}}{V_{out} - V_{in}} \tag{41}$$

If buck-boost converter works in BCM, inductor value should be like this:

$$I_L = \frac{V_{in}D}{(1-D)^2R} = \frac{\Delta i_L}{2} \tag{42}$$

$$L = \frac{V_{in}DT}{2I_L} = \frac{(1-D)^2R}{2f} \tag{43}$$

Capacitor should be selected according to output voltage ripple sensitivity:

$$C = \frac{V_{out}DT}{R\Delta V_{out}} = \frac{D}{Rf(\Delta V_{out}/V_{out})} \tag{44}$$

Switch and diode parameters are:

$$I_{L(max)} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \text{ and } V_{SW} = V_{in} - V_{out}, I_{SW} = I_{L(max)}, V_D = V_{in} - V_{out}, I_D = I_{L(max)} \tag{45}$$

2.4. Cük Converter

Cük converter is a derivation of boost-buck converter. The output voltage of cük converter is either smaller or larger than the input voltage. The polarity of the output voltage is opposite of the input voltage. The inductor on the input side acts as a filter for power supply to prevent large harmonic content. Unlike the other converters, capacitor C_1 stores and transfers energy. The circuit of cük converter given in Figure 9 [1,13,15].

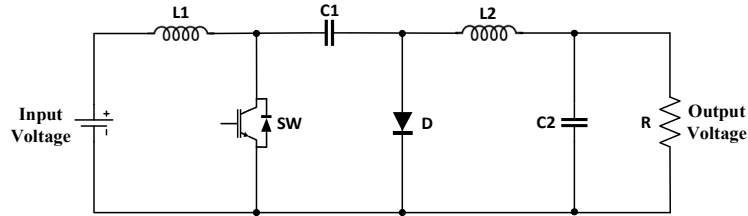


Figure 9. Cük converter circuit

Cük Converter can be analyzed in two states: switch on and switch off. When the switch is on, it acts as a short circuit and diode is reverse biased and acts as an open circuit. In this state, inductor currents I_{L1} and I_{L2} flow through the switch, C_1 discharges through the switch and transferring energy to output and L_2 , meanwhile, input feeds energy to L_1 . When the switch is off, it acts as an open circuit and diode is reverse biased and acts as a short circuit. In this state, inductor currents I_{L1} and I_{L2} flow through the diode, C_1 charges through the diode from both input and L_1 , energy stored in L_2 feeds the output. The derivations and calculations of Cük converter is shown in Equations (47-63). The states of Cük Converter are represented in Figure 10 [13-15].

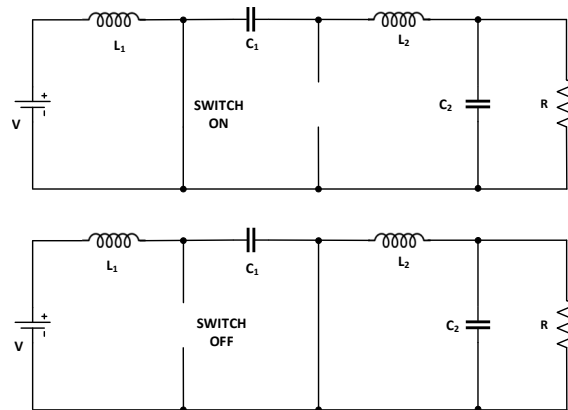


Figure 10. Cük converter states

Switch is **ON STATE**

$$i_{C1} = -I_{L2} \quad (46)$$

Switch is **OFF STATE**

$$i_{C1} = I_{L1} \quad (47)$$

$$-V_{out}I_{L2} = V_{in}I_{L1} \quad (48)$$

$$[(i_{C1})_{closed}]DT + [(i_{C1})_{open}](1 - D)T = 0 \quad (49)$$

$$-I_{L2}DT + I_{L1}(1 - D)T = 0 \quad (50)$$

$$\frac{I_{L1}}{I_{L2}} = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (51)$$

$$D = \frac{V_{out}}{V_{out}-V_{in}} \quad (52)$$

If Cük Converter works in BCM, inductor value should be like this:

$$L_1 = \frac{(1-D)^2 R}{2Df} \quad (53)$$

$$L_2 = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (54)$$

Output capacitor should be selected according to output voltage ripple sensitivity:

$$C_2 = \frac{1-D}{8L_2 f^2 (\Delta V_{out}/V_{out})} \quad (55)$$

Input capacitor should be selected according to capacitor voltage ripple sensitivity:

$$C_1 = \frac{DV_{out}}{Rf\Delta V_{C1}} \quad (56)$$

Switch and diode parameters are:

$$I_{L2} = \frac{V_{out}}{R} \quad (57)$$

$$I_{L1} = I_{L2} \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (58)$$

$$\Delta i_{L1} = \frac{V_{in}D}{L_1 f} \quad (59)$$

$$\Delta i_{L2} = \frac{V_{in}D}{L_2 f} \quad (60)$$

$$I_{L1(max)} = I_{L1} + \frac{\Delta i_{L1}}{2} \quad (61)$$

$$I_{L2(max)} = I_{L2} + \frac{\Delta i_{L2}}{2} \quad (62)$$

$$V_{SW} = V_{in}, I_{SW} = I_{L1(max)} + I_{L2(max)}, V_D = V_{out}, I_D = I_{L1(max)} + I_{L2(max)} \quad (63)$$

2.5. Flyback Converter

Flyback converter is an isolated or transformer version of buck-boost converter. In flyback converter, inductance of buck-boost converter is replaced by a transformer and a magnetizing inductance added to it. Flyback converter generally used in applications that demand below 50W power. On the contrary to buck-boost converter, according to replacement of transformer windings, the polarity of output voltage can be either positive or negative in flyback converter. The circuit of flyback converter represented in Figure 11 [1,14,16].

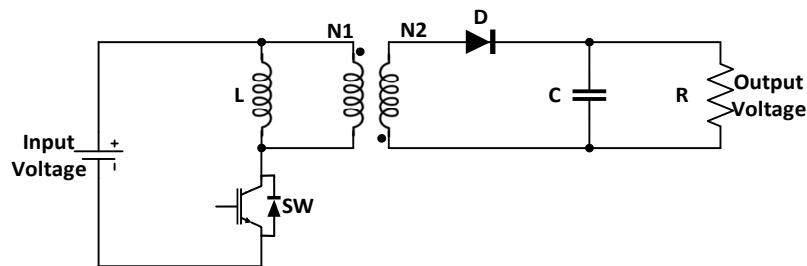


Figure 11. Flyback converter circuit

Flyback converter can be analyzed in two states: switch on and switch off. When the switch is on it acts as a short circuit and diode is reverse biased and acts as an open circuit. In this state, the current in the magnetizing inductance increases linearly and there is no current in the ideal transformer windings. When the switch is off it acts as an open circuit and diode is forward biased and acts as a short circuit. In this state magnetizing inductance supplies current to the ideal transformer windings therefore to the output. The derivations and calculations of flyback converter is shown in Equations (64-74) The states of flyback transformer are represented in Figure 12 [1,13,15].

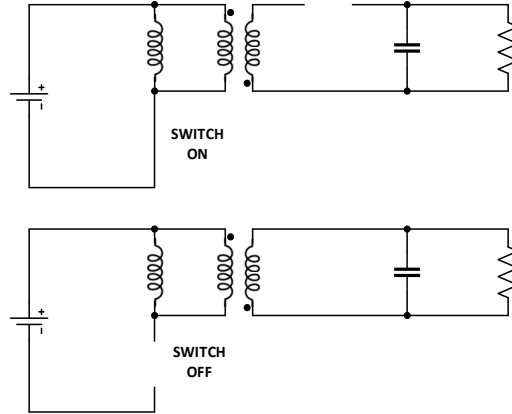


Figure 12. Flyback converter states

Switch is **ON STATE**

$$V_L = V_{in} \quad (64)$$

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} \quad (65)$$

$$\frac{V_{in}}{L} DT = \Delta i_L \quad (66)$$

Switch is **OFF STATE**

$$V_L = V_{out} \frac{N_1}{N_2} \quad (67)$$

$$\frac{V_{out}}{L} \frac{N_1}{N_2} (1-D)T = \Delta i_L \quad (68)$$

$$\frac{V_{in}}{L} DT = \frac{V_{out}}{L} \frac{N_1}{N_2} (1-D)T \quad (69)$$

$$D = \frac{1}{\frac{V_{in} N_2}{V_{out} N_1} + 1} \quad (70)$$

If flyback converter works in BCM, inductor value should be like this:

$$I_L = \frac{V_{in} D}{(1-D)^2 R} \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 = \frac{\Delta i_L}{2} \quad (71)$$

$$L = \frac{V_{in} DT}{2I_L} = \frac{(1-D)^2 R}{2f} \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (72)$$

Capacitor should be selected according to output voltage ripple sensitivity:

$$C = \frac{V_{out} DT}{R \Delta V_{out}} = \frac{D}{Rf(\Delta V_{out}/V_{out})} \quad (73)$$

Switch and diode parameters are:

$$I_{L(max)} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \tag{74}$$

$$V_{SW} = V_{in} + V_{out} \frac{N_1}{N_2}, \quad I_{SW} = I_{L(max)} \frac{N_2}{N_1}, \quad V_D = V_{in} \frac{N_2}{N_1} - V_{out}, \quad I_D = I_{L(max)} \tag{75}$$

2.6. Forward Converter

Forward converter is one of the converters that derived from buck converter. It is made by adding a transformer and diode D_1 between switch and diode D_2 . It has three transformer windings. Windings 1 and 2 are used for voltage transmission from source to load, winding 3 used to allow a path to magnetizing current that it can go down to zero before a new switching cycle. Forward converter used in applications up to power level of a kW that needs isolation. The circuit of forward converter given in Figure 13 [1,15], [16].

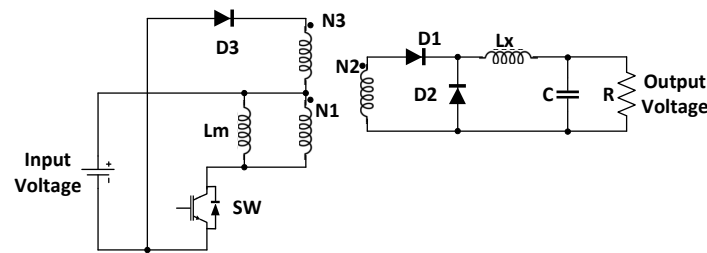


Figure 13. Forward converter circuit

Forward converter can be analyzed in two states: switch on and switch off. When the switch is on, it acts as a short circuit, D_3 is reverse biased and acts as an open circuit, D_2 is reverse biased and acts as an open circuit and D_1 is forward biased and acts as a short circuit. In this state, energy is transferred from input to output and stored in magnetizing inductance L_m and inductive element L_x .

When switch is off, it acts as an open circuit, and D_1 is reverse biased and acts as an open circuit, D_2 is forward biased and acts as a short circuit and D_3 is forward biased and acts as a short circuit. In this state, inductive element L_x supplies energy to output. The magnetizing current that stored in the core of the transformer dissipated through the winding 3 and diode D_3 . The derivations and calculations of forward converter are shown in Equations (76-89). The states of forward transformer represented in Figure 14 [14-16].

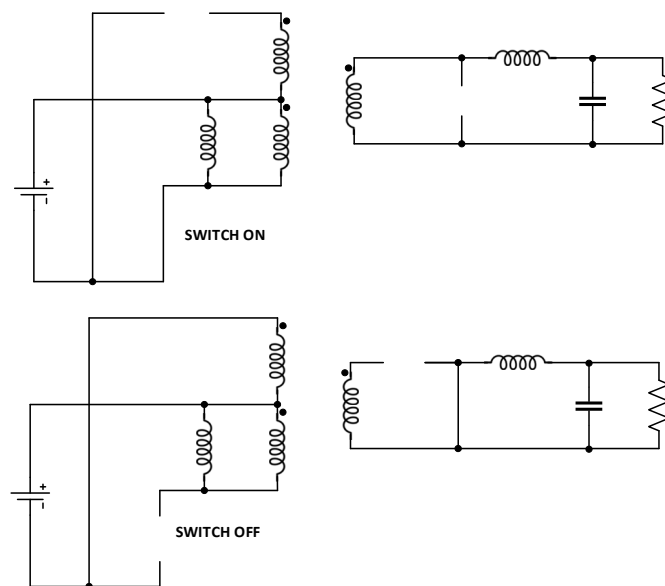


Figure 14. Forward converter states

Switch is **ON STATE**

$$V_{Lx} = V_{in} \frac{N_2}{N_1} - V_{out} \quad (76)$$

$$V_{Lx}(t) = Lx \frac{di_{Lx}(t)}{dt} \quad (77)$$

$$\left(V_{in} \frac{N_2}{N_1} - V_{out} \right) \frac{DT}{Lx} = \Delta i_{Lx} \quad (78)$$

Switch is **OFF STATE**

$$V_{Lx} = V_{out} \quad (79)$$

$$\frac{V_{out}}{Lx} (1 - D)T = \Delta i_{Lx} \quad (80)$$

$$\left(V_{in} \frac{N_2}{N_1} - V_{out} \right) \frac{DT}{Lx} = \frac{V_{out}}{Lx} (1 - D)T \quad (81)$$

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in} \frac{N_2}{N_1}} \quad (82)$$

If forward converter works in BCM, inductor value should be like this:

$$I_{Lx} = \frac{V_{out}}{R} = \frac{\Delta i_{Lx}}{2} \quad (83)$$

$$Lx = \frac{V_{out}(1-D)T}{2I_{Lx}} = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (84)$$

$$Lm = \frac{V_{in}D}{\Delta i_{Lm}f} \quad (85)$$

Capacitor should be selected according to output voltage ripple sensitivity:

$$C = \frac{V_{in}D(1-D)T^2}{8Lx\Delta V_{out}} = \frac{1-D}{8Lxf^2(\Delta V_{out}/V_{out})} \quad (86)$$

Switch and diodes parameters are:

$$I_{Lx(max)} = I_{Lx} + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (87)$$

$$V_{SW} = V_{in} \left(1 + \frac{N_1}{N_3} \right), I_{SW} = I_{L(max)} \frac{N_2}{N_1}, \quad (88)$$

$$V_{D1} = V_{in} \frac{N_2}{N_3} - V_{out}, I_{D1} = I_{Lx(max)}, V_{D2} = V_{out}, I_{D2} = I_{Lx(max)}, V_{D3} = V_{in} \quad (89)$$

2.7. Push-Pull Converter

Push-pull converter is another example derived from buck converters. Its main advantage is that its switches are driven with respect to the ground. The disadvantages of the converter are that the voltage stress of its switches is high equal to the $2V_{in}$ and during the power transfer, only one half of the primary and secondary windings of the transformer used. The switches of push-pull converter operate shifted in phase by $T/2$ with the same duty ratio, so, the duty ratio of switches must be smaller than 0.5. The power level of its applications differs from 150W to 500W. The circuit of push-pull converter is represented in Figure 15 [1,14,16].

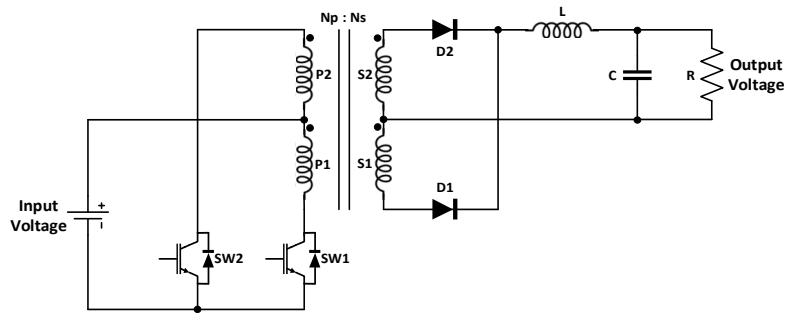


Figure 15. Push-Pull converter circuit

Push-pull converter works in two intervals that follow one another, that one interval can be analyzed in two states as shown in Figure 16.

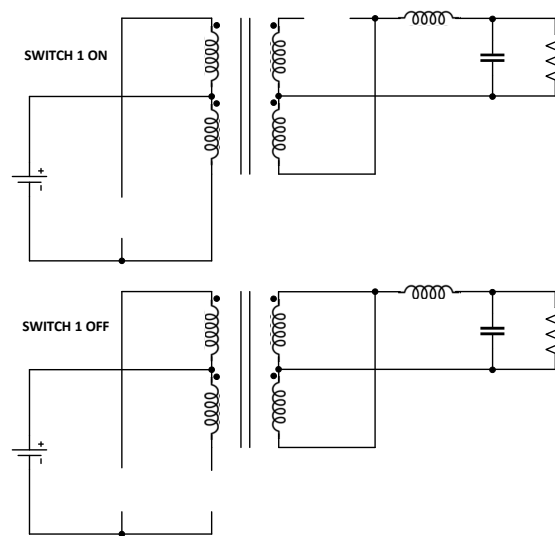


Figure 16. Push-Pull converter states in T/2

When switch 1 is on, it acts as a short circuit, D_1 is forward biased and acts as a short circuit and D_2 is reverse biased and acts as an open circuit. In this state, input directly supplies energy to output and charges inductor. When switch 1 is off, it acts as an open circuit, D_1 is forward biased and acts as a short circuit and D_2 is forward biased and acts as a short circuit. In this state, inductor supplies energy to output, D_1 and D_2 equally share the current of the inductor. Same things are going to happen for the other interval [1,14]. The derivations and calculations of Push-Pull converter are shown in Equations (90-102).

Switch is **ON STATE**

$$V_L = V_{in} \frac{N_s}{N_p} - V_{out} \tag{90}$$

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} \tag{91}$$

$$\left(V_{in} \frac{N_s}{N_p} - V_{out} \right) \frac{DT}{L} = \Delta i_L \tag{92}$$

Switch is **OFF STATE**

$$V_L = V_{out} \tag{93}$$

$$\frac{V_{out}}{L} (1 - D)T = \Delta i_L \tag{94}$$

$$\left(V_{in} \frac{N_s}{N_p} - V_{out}\right) \frac{DT}{L} DT = \frac{V_{out}}{L} (1-D)T \quad (95)$$

$$D = \frac{V_{out}N_p}{2V_{in}N_s} \quad (96)$$

If push-pull converter works in BCM, inductor value should be like this:

$$I_L = \frac{V_{out}}{R} = \frac{\Delta i_L}{2} \quad (97)$$

$$L = \frac{V_{out}DT}{2I_L} = \frac{R}{2f} \left(\frac{1}{2} - D\right) \quad (98)$$

Capacitor should be selected according to output voltage ripple sensitivity:

$$C = \frac{V_{out}DT}{R\Delta V_{out}} = \frac{1-2D}{32Lf^2(\Delta V_{out}/V_{out})} \quad (99)$$

Switches and diodes parameters are shown in Equations (100,102):

$$I_{L(max)} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (100)$$

$$V_{SW} = 2V_{in}, I_{SW} = I_{L(max)} \frac{N_2}{N_1}, \quad (101)$$

$$V_D = V_{in} \frac{N_2}{N_1} - V_{out}, I_D = I_{L(max)} \quad (102)$$

3. DEVELOPMENT OF SOFTWARE

DC-DC Converter Calculator is a comprehensive software tool that was developed using python. This application serves as a practical and educational tool for power electronics engineers and students. The application lets the users calculate and visualize key parameters of various DC-DC converter topologies.

The steps of the software running algorithm as under:

1. Start the program
2. Select the converter tab and conduction mode
3. Enter the input values
4. Press the "Calculate" button to write the calculated values on the screen
5. If you want to print the calculated values, press "Print..." button
6. If you want to save the calculated values into a TXT file, press "Save as..." button
7. Exit the program

For the user interface design, Tkinter graphical user interface library has been used. The application uses a tabbed interface structure where each DC-DC converter topology has its dedicated tab. The main components are a notebook widget for tab management, circuit diagram display using canvas, input fields for voltage, power, frequency, ripple percentage, and transformer turn ratio parameters, mode selection using radio buttons (CCM, BCM, DCM), calculation results display for inductance, capacitance, and voltage and current values of switches and diodes [7,8].

The application covers seven fundamental DC-DC converter types: Buck, Boost, Buck-Boost, Cük, Flyback, Forward, and Push-Pull converters. Interface of the application can be seen in Figure 17.

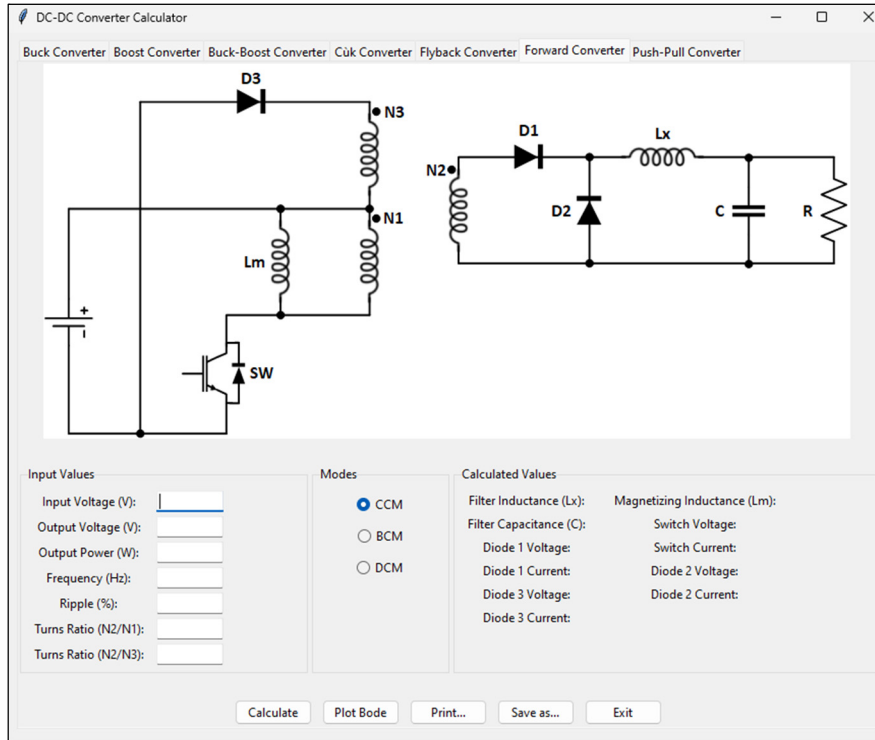


Figure 17. Software user interface

In the application interface, each converter tab displays a circuit diagram with dynamic parameter overlays. The application does instant computation of inductance, capacitance, and component stresses for three modes that DC-DC converters work in: Continuous Conduction Mode (CCM), Boundary Conduction Mode (BCM), and Discontinuous Conduction Mode (DCM). For CCM calculations, as a reference, inductor values are calculated 30% higher than BCM in the application. For DCM calculations, duty ratio value selected as %80 of the original value. The interface of calculations in DCM are shown in Figure 18.

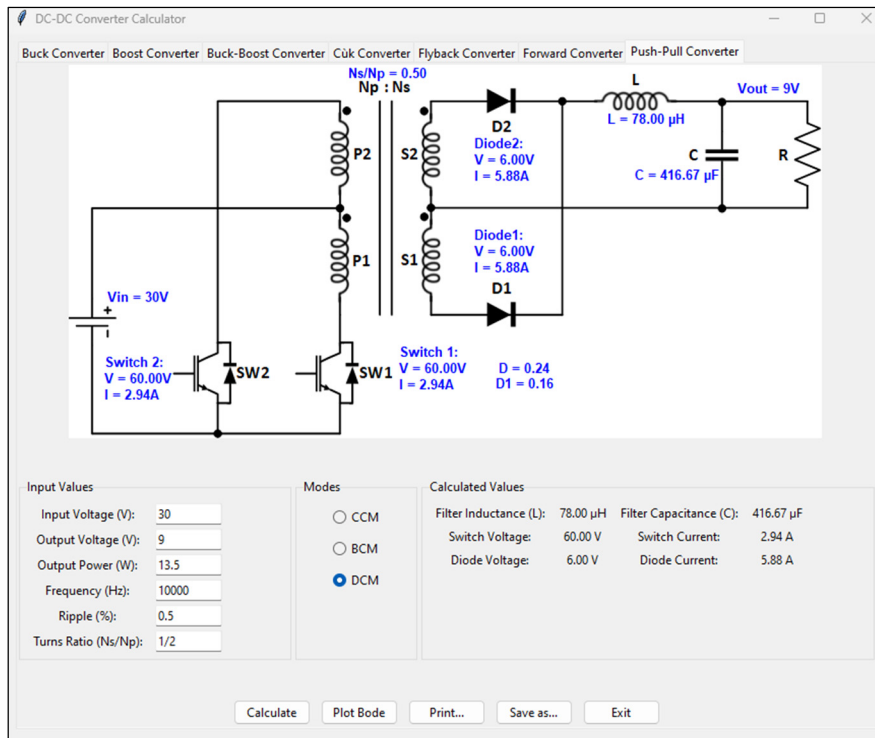


Figure 18. Push-Pull converter calculations in DCM

After pressing the Calculate button, if desired, the calculated values can be sent to the printer by using Print button, saved to a txt file by using Save as button, drawn to the bode plot of DC-DC converter by using Plot Bode button, or can be quitted from the application by using Exit. Print, Save As and Bode Plot Screens are shown in Figure 14 respectively.

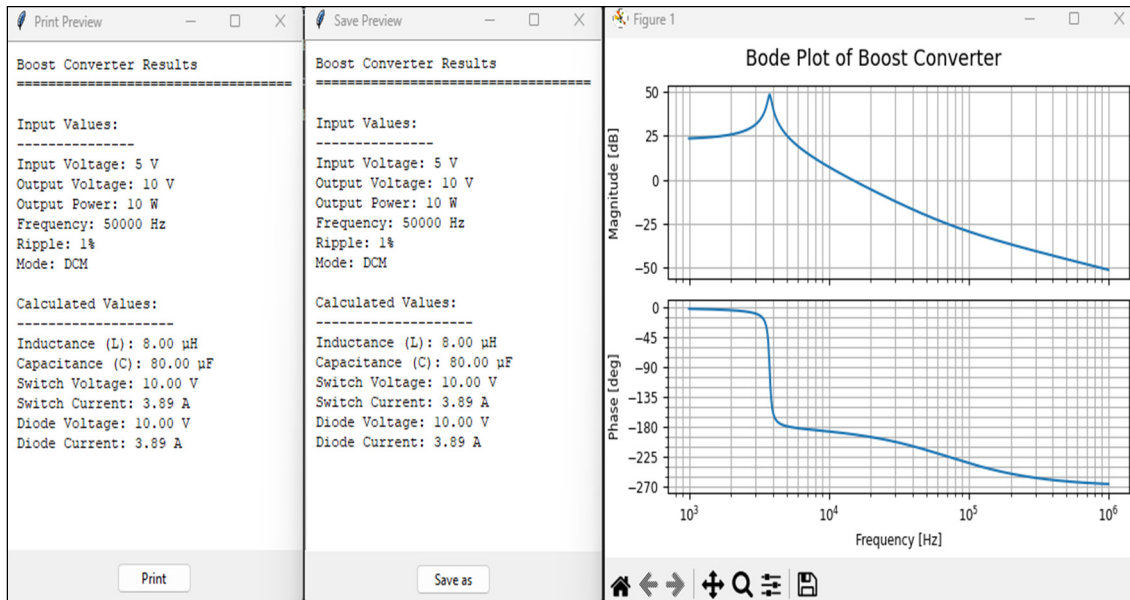


Figure 19. Print, save as and bode plot screens

The application is packaged into a standalone executable using PyInstaller, making it easily distributable to end users. The distribution package includes the main executable file and circuit diagrams of images. This tool serves as a practical learning aid for power electronics students, quick reference tool for engineers and visualization platform for understanding converter behavior under different operating conditions. Potential improvements can be the addition of more converter topologies, waveform visualization, component selection recommendations, showing functions of calculations and letting users to modify the formulas [9,10].

The DC-DC Converter Calculator is a practical engineering tool. Its modular design, user-friendly interface, and comprehensive calculations make it a valuable resource for power electronics education and design. This article section provides an overview of the application's development while remaining accessible to readers with a basic understanding of power electronics and software development.

4. CONCLUSION

In this study, information related to DC-DC converters that were selected for this article has been given. DC-DC converters are power electronics devices that change voltage levels according to user or application needs. There are various kinds of DC-DC converters that are developed for different usage areas. Different formulas have been computed for every DC-DC converter. These formulas are used to select components of DC-DC converters. This article is written with the aim of making these calculations more convenient.

In this article, component selection formulas of DC-DC converters that work in BCM have been given. The software that has been developed for this article covers the formulas for three conduction modes that the selected DC-DC converters work in. The formulas that have been used in this study can be seen in Table 1.

Consequently, in this study, the implementation of DC-DC converter calculator software that calculates inductance, capacitance and stress values of DC-DC converters is carried out. With this article and software, calculations for DC-DC converters will be easier.

Table 1. DC-DC converter formulas in BCM

Components Converters	Duty Cycle	Inductance	Capacitance	Switch	Diode
Buck Converter	$D = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}$	$L = \frac{(1-D) \cdot R}{2 \cdot f}$	$C = \frac{(1-D)}{8 \cdot L \cdot f^2 \cdot ripple}$	$V_{SW} = V_{IN}$ $I_{SW} = \frac{V_{OUT}}{R} + \frac{(1-D) \cdot V_{OUT}}{2 \cdot f \cdot L}$	$V_D = V_{IN}$ $I_D = \frac{V_{OUT}}{R} + \frac{(1-D) \cdot V_{OUT}}{2 \cdot f \cdot L}$
Boost Converter	$D = 1 - \frac{V_{IN}}{V_{OUT}}$	$L = \frac{D \cdot (1-D)^2 \cdot R}{2 \cdot f}$	$C = \frac{D}{R \cdot f \cdot ripple}$	$V_{SW} = V_{OUT}$ $I_{SW} = \frac{V_{IN}}{(1-D)^2 \cdot R} + \frac{D \cdot V_{IN}}{2 \cdot f \cdot L}$	$V_D = V_{OUT}$ $I_D = \frac{V_{IN}}{(1-D)^2 \cdot R} + \frac{D \cdot V_{IN}}{2 \cdot f \cdot L}$
Buck-Boost Converter	$D = \frac{V_{OUT}}{V_{OUT} - V_{IN}}$	$L = \frac{(1-D)^2 \cdot R}{2 \cdot f}$	$C = \frac{D}{R \cdot f \cdot ripple}$	$V_{SW} = V_{IN} \cdot V_{OUT}$ $I_{SW} = \frac{V_{IN}}{(1-D)^2 \cdot R} + \frac{D \cdot V_{IN}}{2 \cdot f \cdot L}$	$V_D = V_{IN} \cdot V_{OUT}$ $I_D = \frac{V_{IN}}{(1-D)^2 \cdot R} + \frac{D \cdot V_{IN}}{2 \cdot f \cdot L}$
Çuk Converter	$D = \frac{V_{OUT}}{V_{OUT} - V_{IN}}$	$L_1 = \frac{(1-D)^2 \cdot R}{2 \cdot D \cdot f}$ $L_2 = \frac{(1-D) \cdot R}{2 \cdot f}$	$C_1 = \frac{D \cdot V_{OUT}}{R \cdot f \cdot \Delta V_{C1}}$ $C_2 = \frac{(1-D)}{8 \cdot L_2 \cdot f^2 \cdot ripple}$	$V_{SW} = V_{IN}$ $I_{SW} = \frac{P}{V_{IN}} + \frac{D \cdot V_{IN}}{2 \cdot f \cdot L_1} + \frac{V_{OUT}}{R} + \frac{D \cdot V_{IN}}{2 \cdot f \cdot L_2}$	$V_D = V_{OUT}$ $I_D = \frac{V_{OUT}}{R} + \frac{D \cdot V_{IN}}{2 \cdot f \cdot L_2} + \frac{P}{V_{IN}} + \frac{D \cdot V_{IN}}{2 \cdot f \cdot L_1}$
Flyback Converter	$D = \frac{1}{\frac{V_{IN}}{V_{OUT}} + \frac{N_2}{N_1} + 1}$	$L = \frac{(1-D)^2 \cdot R \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2}{2 \cdot f}$	$C = \frac{D}{R \cdot f \cdot ripple}$	$V_{SW} = V_{IN} + \frac{V_{OUT} \cdot N_1}{N_2}$ $I_{SW} = \frac{V_{OUT}^2}{V_{IN} \cdot D \cdot R} + \frac{D \cdot V_{IN}}{2 \cdot f \cdot L}$	$V_D = \frac{V_{IN} \cdot N_2}{N_1} - V_{OUT}$ $I_D = \frac{I_{SW} \cdot N_1}{N_2}$
Forward Converter	$D = \frac{V_{OUT}}{V_{IN} \cdot \frac{N_2}{N_1}}$	$L_x = \frac{(1-D) \cdot R}{2 \cdot f}$ $L_m = \frac{R \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2}{2 \cdot f}$	$C = \frac{(1-D)}{8 \cdot L_x \cdot f^2 \cdot ripple}$	$V_{SW} = V_{IN} \cdot \left(1 + \frac{N_1}{N_3}\right)$ $I_{SW} = \left(\frac{P}{V_{OUT}} + \frac{(1-D) \cdot V_{OUT}}{2 \cdot f \cdot L_x}\right) \frac{N_1}{N_2} + \frac{D \cdot V_{IN}}{2 \cdot f \cdot L_m}$	$V_{D1} = \frac{V_{IN} \cdot N_2}{N_3}$ $V_{D2} = V_{OUT}$ $V_{D3} = V_{IN}$ $I_{D1} = I_{D2} = \frac{V_{OUT}}{R} + \frac{(1-D) \cdot V_{OUT}}{2 \cdot f \cdot L_x}$ $I_{D3} = 0$
Push-Pull Converter	$D = \frac{V_{OUT} \cdot N_p}{2 \cdot V_{IN} \cdot N_s}$	$L = \frac{R}{2 \cdot f} \left(\frac{1}{2} - D\right)$	$C = \frac{(1-2 \cdot D)}{32 \cdot L \cdot f^2 \cdot ripple}$	$V_{SW} = 2 \cdot V_{IN}$ $I_{SW} = \left(\frac{V_{OUT}}{R} + \frac{(1-D) \cdot V_{OUT}}{2 \cdot f \cdot L}\right) \frac{N_2}{N_1}$	$V_{D1} = V_{D2} = V_{IN}$ $I_{D1} = I_{D2} = \frac{V_{OUT}}{R} + \frac{(1-D) \cdot V_{OUT}}{2 \cdot f \cdot L}$

This article and software will be a practical and educational tool for students, experienced engineers and newly graduated engineers that are associated with power electronics. It is thought that this software will at least be a reference point for users. In order to obtain the program, it is recommended to contact the corresponding author via e-mail.

5. REFERENCES

1. Kazimierczuk, M.K. (2008). Pulse-width Modulated DC–DC Power Converters. John Wiley & Sons, Ltd.
2. Cham, J.D., Koffi, F.L.D., Boum, A.T., Harrison, A., Zengue, P.M.D., & Alombah, N.H. (2025). Accurate and optimal control of a bidirectional DC-DC converter: A robust adaptive approach enhanced by particle swarm optimization. *Elsevier: e-Prime Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 11, 100899.
3. Veerakoundar, V. & Subramaniam, S. (2024). An efficient and compact voltage feed-forward DAB-based bidirectional DC–DC converter for onboard EV charger. *Elsevier: Computers and Electrical Engineering*, 122, 109979.
4. García-Rodríguez, V.H., Ambrosio-Lázaro, R.C., Pérez-Cruz, J.H., Tavera-Mosqueda, S. & Ascencio-Hurtado, C.R. (2025). Bipolar voltage tracking control for DC/DC Boost converter–full-bridge Buck inverter system: Design and analysis. *Elsevier: Results in Engineering*, 25, 103690.
5. Lalmalsawmi, Biswas, P.K. (2022). Full-bridge DC-DC converter and boost DC-DC converter with resonant circuit for plug-in hybrid electric vehicles. *2022 International Conference on Intelligent Controller and Computing for Smart Power (ICICCCSP)*, 21-23 July 2022, Hyderabad, India, 1-6.
6. Kanaan, H.Y. & Al-Haddad, K. (2005). Modeling and simulation of DC-DC power converters in CCM and DCM using the switching functions approach: Application to the buck and çuk converters, *International Conference on Power Electronics and Drives Systems*, 28 November 2005 - 01 December 2005, Kuala Lumpur, Malaysia, 468-473.
7. Vasavi, S., Nikhita Sri, P.D.L. & Sai Krishna, P.V. (2024). GUI-Enabled boundary regularization system for urban buildings using the tkinter. *2nd International Conference on Device Intelligence, Computing and Communication Technologies (DICCT)*, 15-16 March 2024, Dehradun, India, 424-429.
8. Charan Sai, P., Karthik, K., Bhargav Prasad, K., Pranav, C.V.S. & Divya, K.V. (2024). Real-time task manager: A Python-based approach using psutil and tkinter. *8th International Conference on Computational System and Information Technology for Sustainable Solutions (CSITSS)*, Bengaluru, India, 7-9 November 2024, 1-6.
9. Spencer, M., Sheiati, S. & Chen, X. (2023). AQUADAGUI: A graphical user interface for automated quantification of damages in composite structures under fatigue loading using computer vision and thermography. *Elsevier: SoftwareX*, 22, 101392.

10. Yoon, G. & Rho, J. (2021). MAXIM: Metasurfaces-oriented electromagnetic wave simulation software with intuitive graphical user interfaces. *Elsevier: Computer Physics Communications*, 264, 107846.
11. Soheli, S.N., Sarowar, G., Hoque, A. & Hasan, S. (2018). Design and analysis of a DC-DC buck boost converter to achieve high efficiency and low voltage gain by using buck boost topology into buck topology. *International Conference on Advancement in Electrical and Electronic Engineering (ICAEEE)*, 22-24 November 2018, Gazipur, Bangladesh, 1-4.
12. Yadav, J.G., Yadav, Y.K. & Kumar, N. (2023). Mathematical modelling & simulation of synchronous buck converter and analysis of its simulation results. *International Conference on IoT, Communication and Automation Technology (ICICAT)*, 23-24 June 2023, Gorakhpur, India, 1-6.
13. Mohan, N., Undeland, T.M. & Robbins, W.P. (1995). Power electronics, converters, applications, and design. John Wiley & Sons, Inc.
14. Rashid, M.H. (2001). Power Electronics Handbook. Academic Press.
15. Hart, D.W. (2011). Power Electronics. The McGraw-Hill Companies, Inc.
16. Mohan, N. (2003). Power Electronics and Drives. Minn Power Electronics (MNPERE).

Design and Experimental Verification of an Origami Based Compact Helix Antenna with High Gain Characteristics

Fatih Özkan ALKURT^{1,a}

¹Iskenderun Technical University, Electrical-Electronics Engineering Department, Hatay, Türkiye

^aORCID: 0000-0002-9940-0658

Article Info

Received : 06.09.2024

Accepted : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665955

Corresponding Author

Fatih Özkan ALKURT

fozkan.alkurt@iste.edu.tr

Keywords

Origami antenna

Helix antenna

5G

Microwaves

How to cite: ALKURT, F.Ö., (2025). Design and Experimental Verification of an Origami Based Compact Helix Antenna with High Gain Characteristics. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(1), 171-177.

ABSTRACT

This research presents origami folding technique based novel compact helix antenna design and experimental verification. The study begins by detailing the origami technique to design and construct helical structure using a thin paper. A 1.5 mm wide copper layer is then longitudinally integrated onto the prepared paper layer which is aimed to fold to form a helical configuration. This folded helical structure then combined a fully copper ground layer to create an helix antenna configuration that aims to operate at sub-6 GHz 5G frequencies between 4 GHz and 8 GHz. The helical structure has flexible characteristics which allows for volume reduction and frequency reconfiguration through adjustment in the flexion angle. The flexion angle parametrically examined to obtain optimum operating frequency and the optimum operating frequency is obtained at 6 GHz with 2 GHz bandwidth and 8.32 dBi gain. Proposed antenna structure was manufactured and numerical results were supported experimentally. This antenna is well suited for applications in next generation wireless communication systems, including 5G networks, Internet of Things (IoT) devices, and portable communication technologies such as satellite communication.

Yüksek Kazanç Özelliklerine Sahip Origami Tabanlı Kompakt Heliks Anten Tasarımı ve Deneysel Doğrulaması

Makale Bilgileri

Geliş : 06.09.2024

Kabul : 26.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665955

Sorumlu Yazar

Fatih Özkan ALKURT

fozkan.alkurt@iste.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Origami anten

Heliks Anten

5G

Mikrodalgalar

Atıf şekli: ALKURT, F.Ö., (2025). Yüksek Kazanç Özelliklerine Sahip Origami Tabanlı Kompakt Heliks Anten Tasarımı ve Deneysel Doğrulaması. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(1), 171-177.

ÖZ

Bu araştırma, origami katlama tekniğine dayalı yeni kompakt heliks anten tasarımını ve deneysel doğrulamasını sunmaktadır. Çalışma, ince bir kağıt kullanarak heliks yapıyı tasarlamak ve üretmek için origami tekniğini ayrıntılı olarak açıklamaktadır. Ayrıca, 1,5 mm genişliğinde bir bakır tabaka, heliks bir yapılandırma oluşturmak üzere katlanması amaçlanan kağıt tabakasına uzunlamasına entegre edilmiştir. Bu katlanmış heliks yapı daha sonra, 4 GHz ile 8 GHz arasında 6 GHz altı 5G frekanslarında çalışmayı amaçlayan bir heliks anten oluşturmak için tamamen bakır bir toprak tabakası ile birleştirilmiştir. Heliks yapı, esneme açısının ayarlanması yoluyla hacim azaltımına ve frekans yeniden yapılandırmasına izin veren esnek özelliklere sahiptir. Optimum çalışma frekansını elde etmek için esneme açısı parametrik olarak incelenmiştir ve optimum çalışma frekansı 2 GHz bant genişliği ve 8,32 dBi kazançla 6 GHz'de elde edilmiştir. Önerilen anten yapısı üretilmiştir ve sayısal sonuçlar deneysel olarak desteklenmiştir. Bu anten, 5G ağları, Nesnelerin İnterneti (IoT) cihazları ve uydu iletişimi gibi taşınabilir iletişim teknolojileri dahil olmak üzere yeni nesil kablosuz iletişim sistemlerindeki uygulamalar için oldukça uygundur.

1. INTRODUCTION

Nowadays, the necessity for compact, high performance antennas has significantly increased with the rapid development of wireless communication technologies. As communication systems advanced towards higher frequencies, such as the sub-6 GHz 5G frequency applications, antenna design needs the compelling requirements for bandwidth, gain, and miniaturization [1,2]. In traditional antenna design, these requirements face some challenges when aiming to achieve compactness without any functionality [3]. Origami based engineering technique, which is aimed to fold flat sheets into complex three dimensional structure, has gained attention what provides novel approach to develop compact and reconfigurable structures especially antennas [4,5].

By using origami technique approach, it is possible to create flexible and adaptable structures that can be easily tuned for different frequency bands for applications [6]. The origami principle have been applied various fields such as aerospace engineering, robotics, and deployable structures, that aimed to provide innovative solutions to combine mechanical flexibility with functional performance [7-10]. In the field of antenna design, origami techniques have opened new possibilities for developing antennas with adjustable geometries that allows dynamic reconfiguration of operating frequencies and radiation patterns [11,12]. In previous studies, it is presented that the feasibility of using origami based design to create compact antenna with enhanced gain and bandwidth parameters [13,14]. For example, origami inspired antennas can be easily adaptable in foldable and deployable systems that makes them ideal solutions for space or volume constrained environments [15,16]. Helix antennas are widely used by their suitability in various communication systems, including satellite communications, wireless networks, and radar systems [17-20]. However, traditional helix antenna configurations are rigid and limiting their integration into compact or portable devices [21,22].

This research focuses to address this gap by introducing an origami inspired approach to the design of a compact helix antenna, which is optimized for the sub-6 GHz 5G frequency bands. The proposed design creates a flexible, accordion-like configuration that allows for significant volume reduction while providing high gain characteristics. By using a copper layer into a thin origami folded substrate, the antenna can be reconfigured through adjustments in the flexion angle of helix structure, that enables frequency tuning 4 GHz and 8 GHz frequency band. The study combines both numerical simulations and experimental validation to demonstrate the effectiveness of this design approach.

2. DESIGN AND ANALYSIS

In each step of the design and numerical analysis, Finite Integration Technique (FIT) based microwave simulation software is utilized. Before the numerical analysis, origami folding technique has been approached which is illustrated in Figure 1 with design and folding processes. As shown, origami technique paves the way for accordion-like flexible structure by various geometric manipulation of a thin paper, the geometric design parameters were aimed to operate at sub-6GHz 5G frequencies between 4 GHz and 8 GHz. Firstly, 1x8 paper is folded in horizontal, vertical and diagonal lines, and then it bended vertically to create a curvature which is also illustrated in Figure 1, then that forms a spiral like structure with accordion-like shape.

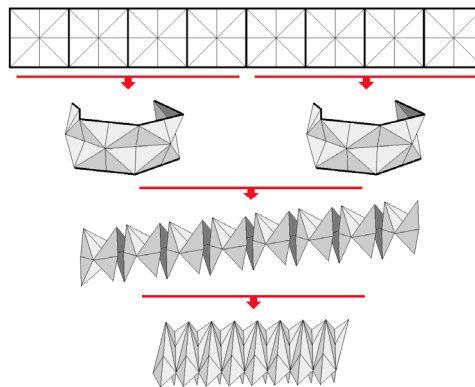


Figure 1. Origami folding technique to design helical accordion

Moreover, a copper line is integrated vertically to 1x8 cell that aims to create an antenna element which is illustrated in Figure 2. The origami approach given in Figure 1 provides the integrated copper line to form a spiral like helix configuration which is also illustrated in Figure 2. This accordion-like helix line with copper material is also integrated to a square metallic plate to create a helix antenna configuration as illustrated below. The advantage of this novel antenna configuration is to have flexible characteristics with its accordion-like shape as shown. The connected discrete port is a 50 ohm standart feeding line to obtain numerical return loss and radiation patterns.

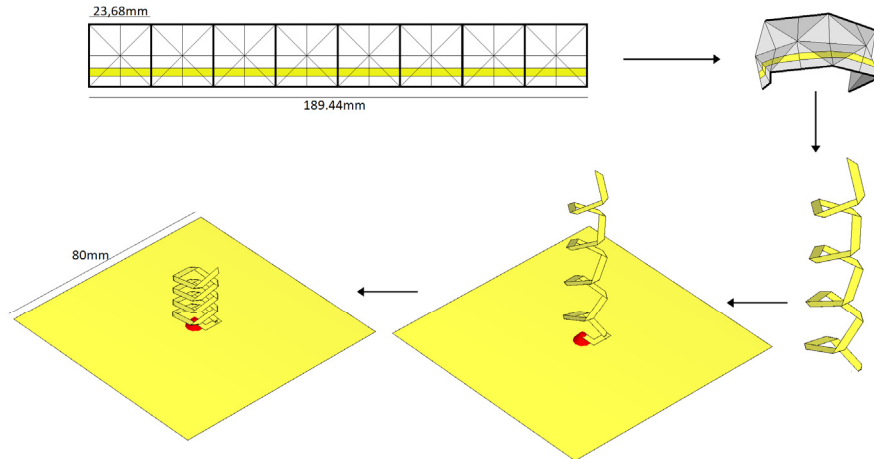


Figure 2. Origami folding based helix antenna design

Furthermore, the flexibility of the proposed accordion-like helix antenna configuration is illustrated in Figure 3. The physical variations of helix antenna versus flexion angle have been examined as illustrated in this figure. The antenna effective length, which affects the operating wavelength, is increased when the flexion angle increase that shown clearly. Figure 3 clearly explains effect of origami technique on helix antenna design, the advantage of this design is to provide lightweight, cheap and compact structure for applications.

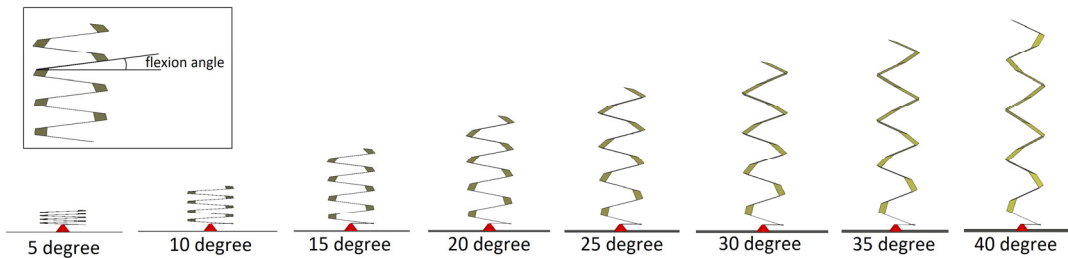


Figure 3. Helix antenna variations versus various flexion angle

To see the effect of flexion angle on antenna S11 return loss parameter, a parametric study was conducted. Figure 4 plots the obtained S11 parameter distributions by the examined parametric study. As shown, designed helix antenna has various resonance band characteristics under different flexion angle condition. The numerical simulations were conducted for the frequency band between 4 GHz and 8 GHz which is sub-6 GHz 5G frequency region for telecommunication applications. For the 5° flexion angle, two resonance peaks occur around 5.75 GHz and 7.75 GHz with -12 dB and -17 dB S11 parameter, respectively. For the 10° flexion angle, two resonance peaks occur around 6.2 GHz and 7.45 GHz with -11 dB and -12 dB S11 parameter. For the 15° flexion angle, a single resonance peak observed at around 5.3 GHz with -20 dB S11 level. For the 20° flexion angle, two resonance peaks observed, first one is narrow band with -20 dB S11 parameter at 5 GHz and the second one has wide band width with centre at 6 GHz with -17 dB S11 parameter. For the 25° flexion angle, a single resonance occurs at 5.1 GHz with -13 dB S11 parameter. For the 30° flexion angle, no resonance peak occurs. For the 35° flexion angle, a single and narrow resonance peak occurs at 4.8 GHz with -42 dB S11 parameter. Finally, for the 40° flexion angle, an ultra wide band resonance obtained from 5 GHz to 7 GHz with 2 GHz bandwidth, the S11 parameter is -17 dB at 6 GHz central frequency.

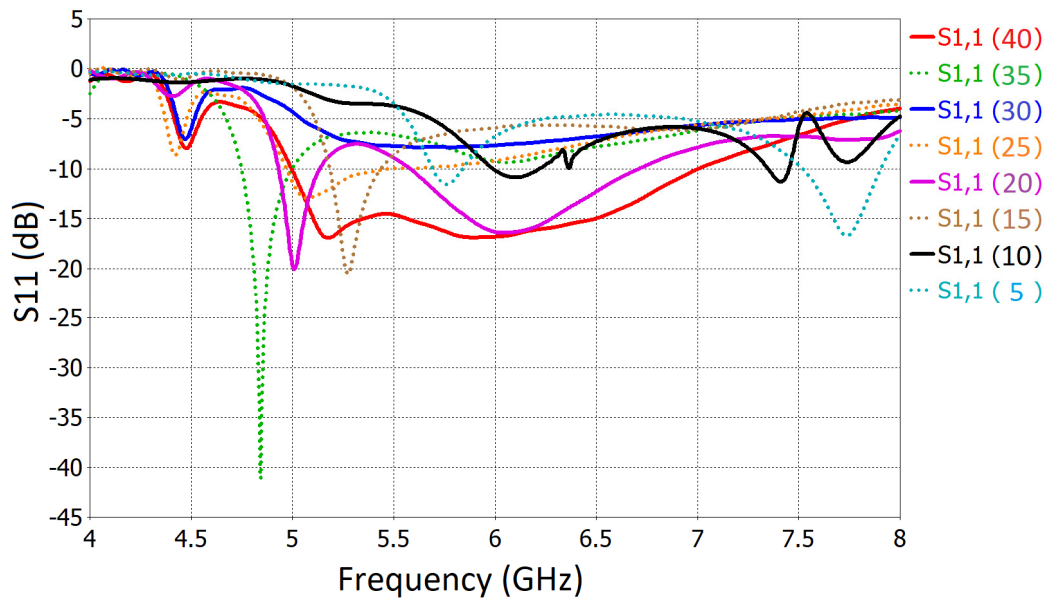


Figure 4. S11 characteristics of proposed helix antenna under different flexion angle conditions

In addition, the farfield radiation pattern distribution of proposed helix antenna is calculated and depicted as shown in Figure 5. This pattern diagrams obtained at 6 GHz with 40 degree flexion angle because the antenna has ultrawide bandwidth at this configuration. Figure 5a and 5b shows proposed antenna structure in side and perspective views with radiation pattern, and the main lobe with a peak gain of 8.32 dBi, indicating a highly focused energy transmission along the axis of the helix. The polar plot of the antenna supports this analysis, showing a main lobe direction at 0 degrees with a 3 dB beamwidth of 68.6 degrees, which indicates a moderate spread of the main lobe that is suitable for applications for precise targeting. Besides, the side lobe level of -9.4 dB shows minimal energy loss in undesired directions.

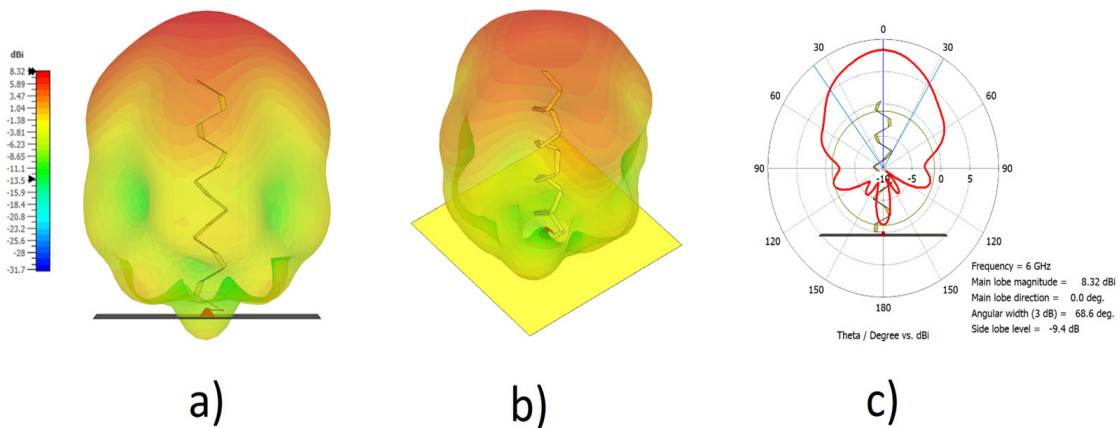


Figure 5. Radiation pattern configuration at 6GHz

3. EXPERIMENTAL RESEARCH

Designed accordion-like origami helix antenna was professionally fabricated by hand which is depicted in Figure 6. In the fabrication process, a thin origami paper is prepared by some folding steps to locate bending lines, firstly. Afterwards, a thin copper tape is integrated as illustrated in figure, which creates a metallic helical configuration in application. To create helical configuration, prepared paper folded by using origami approach as illustrated in figure. Prepared helical structure is then integrated to a square ground plane which has 50 ohm SMA connector for feeding.

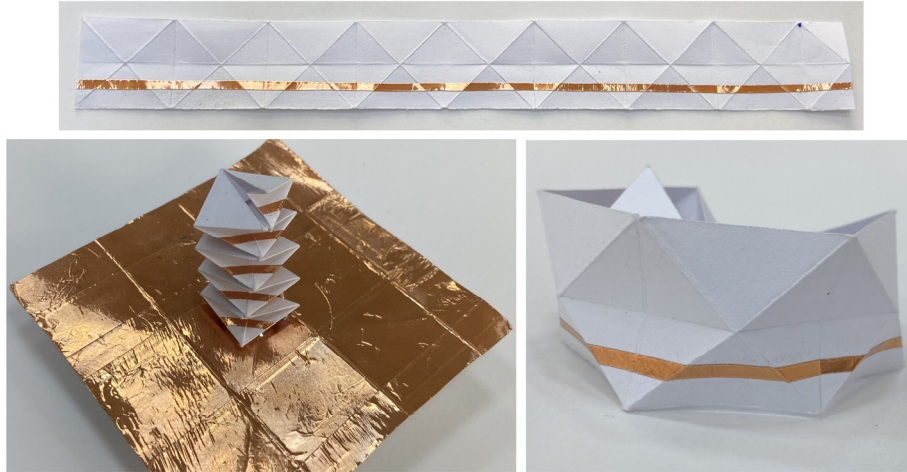


Figure 6. Fabricated accordion-like origami helix antenna

Fabricated accordion-like origami helix antenna was measured in a microwave laboratory by using a vector network analyser as shown in Figure 7a. Before the measurement, some calibration steps were done to minimize losses and noises. Measurement was done at the frequency region between 4 GHz and 8 GHz which is the same frequency band with simulations. Figure 7b and Figure 7c shows the measured S11 parameter characteristics and radiation pattern under 40° flexion angle condition.

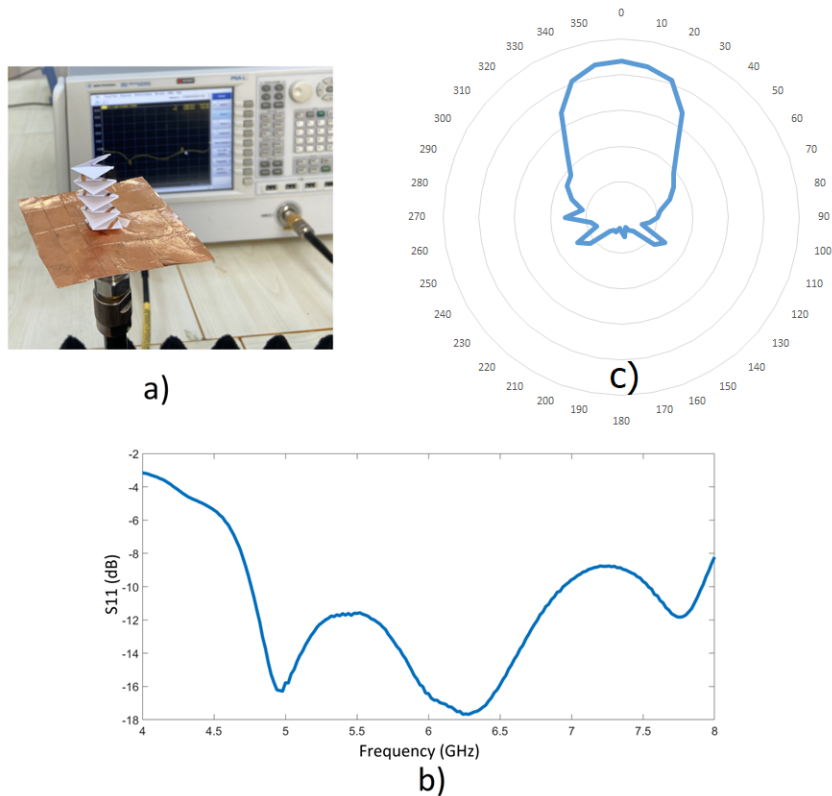


Figure 7. a) measurement setup, b) measured S11 parameter and c) measured radiation pattern of accordion-like origami helix antenna under flexion angle of 40°

Obtained S11 parameter characteristics has nearly the same resonance band with simulation results. As shown, this antenna configuration has resonance band between 4.8 GHz to 6.8 GHz with a wide bandwidth. The small amount of resonance differences caused by laboratory conditions and fabrication imperfections. It is clearly shown that the proposed antenna structure has a huge potential for sub-6 GHz 5G applications by using origami approach in design.

4. RESULTS

This research demonstrated the design, fabrication and experimentally verification of an origami based accordion-like helix antenna structure with high gain characteristics for sub-6 GHz 5G applications. By using the origami technique, a flexible, lightweight and compact helix structure was modelled which is suitable for volume reduction and frequency reconfigurability application by the change of flexion angle. The proposed antenna structure is well optimized to operate at 6 GHz with 2 GHz bandwidth, which has 8.32 dBi gain under 40° flexion angle condition. The proposed helix antenna is suitable for next generation sub-6 GHz 5G applications such as 5G networks and IoT. Both numerical and experimental results show a strong agreement that confirms the effectiveness of the origami based design approach. As shown in this study, the innovative use of origami techniques in antenna design opens new perspective for developing adaptable and efficient communication devices as where space, weight, and frequency reconfigurability are important.

5. REFERENCES

1. Gustavsson, U., Frenger, P., Fager, C., Eriksson, T., Zirath, H., Dielacher, F., ... & Carvalho, N.B. (2021). Implementation challenges and opportunities in beyond-5G and 6G communication. *IEEE Journal of Microwaves, 1*(1), 86-100.
2. Ali, S.A., Wajid, M. & Alam, M.S. (2020). Antenna design challenges for 5G: Assessing future direction. In *Enabling Technologies for Next Generation Wireless Communications*, 149-175. CRC Press.
3. Volakis, J.L., Chen, C.C. & Fujimoto, K. (2010). Small antennas: miniaturization techniques & applications. *Default Book Series*.
4. Shah, S.I.H., Bashir, S., Ashfaq, M., Altaf, A. & Rmili, H. (2021). Lightweight and low-cost deployable origami antennas-A review. *IEEE Access, 9*, 86429-86448.
5. Hwang, M., Kim, G., Kim, S. & Jeong, N.S. (2020). Origami-inspired radiation pattern and shape reconfigurable dipole array antenna at C-band for CubeSat applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 69*(5), 2697-2705.
6. Shah, S.I.H., Lim, S. & Tentzeris, M.M. (2017). Military field deployable antenna using origami. In *2017 International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas, Innovative Structures, and Applications (IWAT)*, 72-73. IEEE.
7. Morgan, J., Magleby, S.P. & Howell, L.L. (2016). An approach to designing origami-adapted aerospace mechanisms. *Journal of Mechanical Design, 138*(5), 052301.
8. Ai, C., Chen, Y., Xu, L., Li, H., Liu, C., Shang, F., ... & Zhang, S. (2021). Current development on origami/kirigami-inspired structure of creased patterns toward robotics. *Advanced Engineering Materials, 23*(10), 2100473.
9. Lang, R.J., Tolman, K.A., Crampton, E.B., Magleby, S.P. & Howell, L.L. (2018). A review of thickness-accommodation techniques in origami-inspired engineering. *Applied Mechanics Reviews, 70*(1), 010805.
10. Turner, N., Goodwine, B. & Sen, M. (2016). A review of origami applications in mechanical engineering. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 230*(14), 2345-2362.
11. Lee, S., Shah, S.I.H., Lee, H.L. & Lim, S. (2019). Frequency-reconfigurable antenna inspired by origami flasher. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 18*(8), 1691-1695.
12. Hwang, M., Kim, G., Kim, S. & Jeong, N.S. (2020). Origami-inspired radiation pattern and shape reconfigurable dipole array antenna at C-band for CubeSat applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 69*(5), 2697-2705.
13. Molaei, A., Liu, C., Felton, S.M. & Martinez-Lorenzo, J. (2018). Origami inspired reconfigurable antenna for wireless communication systems. *arXiv preprint arXiv, 1805.10370*.
14. Liu, X., Yao, S., Cook, B.S., Tentzeris, M.M. & Georgakopoulos, S.V. (2015). An origami reconfigurable axial-mode bifilar helical antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 63*(12), 5897-5903.
15. Yao, S. & Georgakopoulos, S.V. (2017). Origami segmented helical antenna with switchable sense of polarization. *IEEE Access, 6*, 4528-4536.
16. Kaddour, A.S., Zekios, C.L. & Georgakopoulos, S.V. (2020). A reconfigurable origami reflectarray. In *2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 1-4. IEEE.

17. Mittermayer, J., Krieger, G. & Villano, M. (2024). A Novel Approach for In-Orbit Satellite Antenna Pattern Measurement using a Small Satellite Flying in Double-Cross-Helix Formation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.
18. Zeain, M.Y., Zakaria, Z., Abu, M., Al-Gburi, A.J.A., Alsariera, H., Toding, A., ... & Saeidi, T. (2020). Design of helical antenna for next generation wireless communication. *Prz. Elektrotechniczny*, 11, 96-99.
19. Chen, Z., Ma, C., Chu, H., Deng, Z., Chen, S. & Li, G. (2022). An inflatable axial-mode helical antenna with retractability and releasability for satellite navigation and positioning system. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 156, 154345.
20. Pu, Y., Wang, H., Zhao, Y., Yuan, Y., Xi, X. & IEEE Member. (2021). Miniaturized wideband quadrifilar helix antenna for satellite navigation application. *Microwave and Optical Technology Letters*, 63(1), 252-263.
21. Amn-e-Elahi, A., Rezaei, P., Karami, F., Hyjazie, F. & Boutayeb, H. (2022). Analysis and design of a stacked PCBs-based quasi-helix antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 70(12), 12253-12257.
22. Palanisamy, S., Thangaraju, B., Khalaf, O.I., Alotaibi, Y., Alghamdi, S. & Alassery, F. (2021). A novel approach of design and analysis of a hexagonal fractal antenna array (HFAA) for next-generation wireless communication. *Energies*, 14(19), 6204.



İki Boyutlu Kesme ve Çizelgeleme Problemi için Bütünleşik Bir Matematiksel Model ve Bir Matsezgisel Algoritma

Tuğba SARAÇ^{1,a}, Büşra TUTUMLU^{2,b}

¹Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

²Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kütahya

^aORCID: 0000-0002-8115-3206; ^bORCID: 0000-0002-0662-8128

Makale Bilgileri

Geliş : 08.05.2024

Kabul : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665964

Sorumlu Yazar

Tuğba SARAÇ

tsarac@ogu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

İki boyutlu kesme problemi

Karma tamsayı programlama

Teslim zamanı

Matsezgisel algoritma

Atf şekli: SARAÇ, T., TUTUMLU, B., (2025). İki boyutlu Kesme ve Çizelgeleme Problemi için Bütünleşik Bir Matematiksel Model ve Bir Matsezgisel Algoritma. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(1), 179-191.

ÖZ

İki boyutlu kesme problemi, büyük ebatlı bir levhadan küçük boyutlu parçaların nasıl kesileceğinin belirlenmesi problemidir. Endüstride yaygın bir uygulama alanına sahip olması nedeniyle literatürde de sıklıkla ele alınmaktadır. Bu çalışmalarda genellikle en az ana malzeme kullanımı ya da en az fire amaçlanmakta ancak çizelgeleme boyutu ihmal edilmektedir. Literatürde bu iki önemli problemi birlikte dikkate alan çalışmalarda ise sipariş parçalarının 90° döndürülmesi, ya da farklı ana malzeme ebatlarının varlığı gibi problemin karmaşıklığını daha da arttıracak durumlar göz ardı edilmekte ya da sadece birisi ele alınmaktadır. Oysa bu özelliklerin her biri problemin daha başarılı çözümlerinin elde edilebilmesine olanak yaratmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada, parçaların 90° döndürülmesine izin verilen iki amaçlı, iki boyutlu kesme, ana malzeme seçimi ve çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Ele alınan problemin amaçları toplam firenin ve toplam sipariş gecikmelerinin en küçüklümesidir. Problemin çözümü için bütünleşik bir matematiksel model ve bir matsezgisel algoritma önerilmiştir. Önerilen çözüm yaklaşımlarının performansı farklı boyutlara sahip test problemleri kullanılarak gösterilmiştir.

An Integrated Mathematical Model and a Matheuristic Algorithm for the Two-Dimensional Cutting and Scheduling Problem

Article Info

Received : 08.05.2024

Accepted : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665964

Corresponding Author

Tuğba SARAÇ

tsarac@ogu.edu.tr

Keywords

Two-dimensional cutting problem

Mixed-integer programming

Due date

Matheuristic algorithm

How to cite: SARAÇ, T., TUTUMLU, B., (2025). An Integrated Mathematical Model and a Matheuristic Algorithm for the Two-Dimensional Cutting and Scheduling Problem. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(1), 179-191.

ABSTRACT

The two-dimensional cutting problem is the problem of determining how to cut small-sized pieces from a large-sized plate. Since it is widely applied in industry, it is frequently addressed in the literature. In these studies, the aim is usually to minimize the use of stock materials or to minimize waste, but the scheduling dimension is neglected. In the literature, studies that consider these two essential problems together either ignore or consider only one of them, such as the 90° rotation of the order pieces or the presence of different stock material sizes, which would further increase the complexity of the problem. However, each of these features can lead to more successful solutions to the problem. Therefore, in this study, we consider a bi-objective, two-dimensional cutting, assortment, and scheduling problem where the order pieces are allowed to be rotated by 90°. The objectives of the problem are to minimize total waste and total order tardiness. An integrated mathematical model and a matheuristic algorithm are proposed to solve the problem. The performance of the proposed solution approaches is demonstrated using test problems with different sizes.

1. GİRİŞ

Kesme işlemi, en genel hali ile farklı veya aynı geometrik şekillere sahip bir dizi büyük nesneden bir dizi küçük nesne elde edilmesidir. Küçük nesnelere kesildiği büyük nesnelere genellikle ana malzeme olarak adlandırılmaktadır. Küçük nesnelere ise genellikle sipariş parçası denmektedir. Sipariş parçalarının bir ana malzeme üzerine nasıl yerleştirildiğini gösteren plana ise kesme planı denmektedir. Kesme problemleri kesme aşamasında dikkate alınan boyut sayısına göre bir, iki ve üç boyutlu olmak üzere üç ana sınıfa ayrılabilir. İki boyutlu kesme problemi belirli sınırlara sahip iki boyutlu ana malzemelerden daha küçük boyutlu sipariş parçaları kesildiğinde ortaya çıkar. Ana malzeme ve sipariş parçaları dikdörtgen, üçgen, daire vb. geometrik şekillere sahip olabileceği gibi düzensiz bir yapıda da olabilir [1-3]. Sanayide iki boyutlu kesme problemleri ile çelik veya cam levhaların daha küçük parçalara kesilmesi, mobilya üretmek için ahşap levhaların kesilmesi vb. [4] çok yaygın karşılaşılmaktadır. Bu örneklerin önemli bir bölümünde hem ana malzeme hem de sipariş parçaları dikdörtgen biçimindedir.

Problem toplam firenin enküçüklemesi amacı ve sipariş parçalarının en az talep kadar kesilmesi kısıtı ile modellendiğinde kesme problemi olarak adlandırılmaktadır. Aynı problem her sipariş parçası bir ana malzemeye yerleştirilmeli kısıtı ve kullanılacak ana malzeme sayısının enküçüklenmesi amacı ile modellendiğinde ise genellikle paketleme problemi olarak adlandırılmaktadır. Eğer problemde talep kısıtları yer alıyorsa bu kısıt genellikle büyük eşitlik biçiminde olmaktadır. Oysa özellikle sipariş tipi üretim yapan işletmeler için talep fazlası her üretim önemli bir maliyet kalemidir. Bu tip modeller, amaç fonksiyonları da firenin en küçüklenmesi biçiminde tariflenmiş ise firesiz kesme planlarından çok büyük sayılarda türetebilir ve çok fazla sayıda talep fazlası ürün kesilmesini planlayabilirler. Bu nedenle amaç fonksiyonu firenin en küçüklenmesi biçiminde ise talep fazlası üretimin önüne geçebilmek için talep kısıtlarının eşitlik biçiminde tariflenmesi önemlidir.

Sipariş parçalarının kesileceği ana malzemelerin hepsi aynı boyuta sahip değilse ve her bir ana malzeme tipinden stokta belirli sayıda mevcutsa, sipariş parçalarının nasıl kesileceğinin belirlenmesinin yanı sıra her bir kesme planının hangi boyuta sahip ana malzemeden kesileceğinin de belirlenmesi gerekir. Bu karar doğal olarak problemin karmaşıklığını arttıracaktır ancak firelerin azaltılabilmesine de önemli bir fırsat yaratacaktır. Benzer şekilde parçaların ana malzemeye 90° döndürülerek de yerleştirilebilmesi durumunun dikkate alınması da hem problem karmaşıklığını hem de toplam firenin azaltılması fırsatını birlikte arttırmaktadır.

Kesme problemleri, endüstride yaygın bir kullanım alanına sahip olması nedeniyle son yıllarda da araştırmacıların ilgi odağı olmaya devam etmektedir. Russo ve arkadaşları [5], üretim başta olmak üzere çok sayıda gerçek uygulama çalışması dikkate alındığında iki boyutlu kesme problemine büyük bir ilginin olduğundan bahsetmişlerdir. Literatürdeki iki boyutlu kesme problemini ele alan çalışmalar incelendiğinde çoğunlukla firelerin azaltılmasına odaklanıldığı görülmektedir [6-9]. Oysa pek çok işletme için sipariş parçalarının firesiz/en az ana malzeme ile üretimi kadar üretilen sipariş parçalarının müşteriye zamanında teslim edilmesi de kritiktir. Bu nedenle, son yıllarda kesme ve paketleme problemleri, çizelgeleme problemleri ile birlikte ele alınarak siparişlerin teslim zamanları göz önünde bulundurulmaktadır [10-17]. Kesme ve çizelgeleme bütünleşik problemini birlikte ele alan ve siparişlerin teslim zamanlarını dikkate alan çalışmalar Çizelge 1’de verilmiştir. Çizelge 1, altı bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde incelenen çalışma ikinci bölümde problemin tipi; kesme (K) ya da paketleme (P), üçüncü bölümde talep kısıtlarının yapısı; büyük eşitlik (\geq) ya da eşitlik ($=$), dördüncü bölümde ana malzemenin özellikleri; hepsinin aynı boyutta olması (A), farklı boyutta olması (F), stok miktarlarının sınırlı olması (S), beşinci bölümde sipariş parçalarının kesme planına yerleştirilirken 90° döndürülmesine izin verilip verilmediği ve son bölümde de çözüm yöntemi verilmiştir.

Çizelge 1 incelendiğinde, problem kesme problemi biçiminde modellendiğinde genellikle talep kısıtlarının büyük eşitlik biçiminde olduğu ve ana malzemelerin stoktaki miktarlarının sınırlandırılmadığı göze çarpmaktadır. Sadece iki çalışmada farklı ana malzeme ebatlarının olabildiği durum incelenmiştir. Problem paketleme problemi biçiminde modellendiğinde ise her parça bir ana malzemeye atandığından talep tam olarak karşılanmakta talep fazlasına izin verilmemektedir. Bu çalışmalarda genellikle ana malzemenin aynı ebatlara sahip olduğu durum incelenmiştir. Az sayıda çalışmada [15-17] parçaların 90° döndürülmesine izin verilmiştir. Kesme ve çizelgeleme bütünleşik problemi oldukça karmaşık bir problemdir bu nedenle karmaşıklığı daha da arttıracak ana malzeme seçimi ya da parçaların 90° döndürülme kararı gibi ek kararlardan genellikle kaçınılmış ya da sadece birisi göz önünde bulundurulmuştur. Çizelgeden de

görülebileceği gibi, bu çalışma kesme ve çizelgeleme bütünleşik problemine ana malzeme seçimi ve 90° döndürme ek kararlarının birlikte dahil edildiği ilk çalışmadır.

Çizelge 1. Siparişlerin teslim zamanlarını dikkate alan çalışmalar

Çalışma	Problem	Talep		Ana		90° dönme	Çözüm yöntemi
		kısıtları	malzeme	A	F		
		≥	=				
Bu çalışma	K	✓		✓	✓	✓	Matsezgisel algoritma
[10]	K	✓		✓			Sezgisel yöntemler
[11]	K	✓		✓			Sezgisel yöntem
[12]	K ve P	✓		✓		✓	Guguk kuşu arama, yarasa algoritması ve çiçek tozlaşma algoritması
[13]	P	✓		✓	✓		Yinelemeli ağgözlü algoritma
[14]	P	✓	✓			✓	Kısıtlı programlama
[15]	P	✓	✓			✓	Yinelemeli kısıtlı programlama
[16]	P	✓	✓			✓	Sıralı değer düzeltme sezgisel yöntemi
[17]	P	✓	✓			✓	Genetik algoritma

K: kesme, P: paketleme, A: aynı boyut, F: farklı boyut S: stok miktarı sınırlı

Çizelge 1’de yer alan çalışmalar çözüm yöntemleri açısından değerlendirildiğinde problemin NP zor doğası nedeniyle tümünün sezgisel veya metasezgisel çözüm yöntemlerini benimsedikleri görülmektedir. Bu çalışma ele alınan probleme ilk defa bütünleşik bir matematiksel model ve matsezgisel algoritma önerilmesi yönüyle de özgündür.

Çalışmanın izleyen bölümünde ele alınan problem ayrıntılı bir şekilde açıklanmış ve önerilen bütünleşik matematiksel model sunulmuştur. Üçüncü bölümde geliştirilen matsezgisel algoritmaya, dördüncü bölümde ise deneysel sonuçlara yer verilmiştir. Çalışmanın son bölümünde elde edilen sonuçlar tartışılmış ve geleceğe yönelik öneriler sunulmuştur.

2. ELE ALINAN PROBLEM VE ÖNERİLEN MATEMATİKSEL MODEL

n çeşit sipariş parçası m çeşit ana malzemeden kesilecektir. Hem sipariş parçaları hem de ana malzemeler dikdörtgen biçimindedir. Kesilecek parçalar ana malzemeye çakışmayacak şekilde yerleştirilmelidir. Bir ana malzeme üzerine sipariş parçalarının nasıl yerleştirilmesi gerektiğini gösteren çizime kesme planı denir. Sipariş parçaları ana malzemeye 90° döndürülerek de yerleştirilebilir. Ayarlanabilir en ve boy bıçaklarına sahip bir kesme makinası bulunmaktadır, dolayısıyla giyotin kesme şartı yoktur. Bir ana malzeme için hazırlık ve kesme süresi toplamı (γ) sabittir. Bir ana malzeme kesildiğinde sipariş parçaları dışında kullanılmayan parçalar oluştu ise bunlar fire olarak adlandırılmaktadır. Ele alınan problem üç temel problemin bir arada dikkate alındığı bütünleşik yapıdadır. Bu problemler sırasıyla (1) kullanılacak ana malzemelerin belirlenmesi (2) herbir ana malzemeden kesilecek sipariş parçalarının belirlenmesi ve (3) ana malzemelerin kesim sırasının belirlenmesidir. Müşteriden gelen her siparişin (r) bir teslim zamanı (d_r) vardır. Bir siparişte yer alan tüm parçalar farklı bir indis numarası ile işaretlenirler. Ancak her sipariş parçasının hangi siparişe ait olduğu bir parametrede (t_i) saklanır. Bir siparişin tamamlanma zamanı (C_r), siparişteki son parçanın tamamlanma zamanına eşittir. Örneğin son parçası 6. sırada kesilen bir siparişin tamamlanma zamanı 6γ ’dır. Bir sipariş teslim zamanından sonra tamamlanırsa ($C_r > d_r$) sipariş gecikir. r . siparişin gecikme süresi (T_r), tamamlanma zamanından teslim zamanını çıkarılarak ($C_r - d_r$) hesaplanır. Her ana malzemeden stokta belli bir sayıda (s_p) mevcuttur. Bir ana malzeme en fazla stok sayısı kadar kullanılabilir. Ele alınan problemin toplam firenin enküçüklenmesi ve toplam gecikmenin enküçüklenmesi olmak üzere iki amacı vardır.

Ele alınan problemin çözümü için bir matematiksel model geliştirilmiştir. Önerilen matematiksel modelin varsayımları, indisleri, parametreleri ve karar değişkenleri aşağıda listelenmiştir.

varsayımlar:

- Elde tüm ürünlerin taleplerinin karşılanabileceği kadar ana malzeme stoğu mevcuttur.
- m çeşit ana malzemeden her biri sınırlı sayıda stoğa sahiptir. Ve bir ana malzemenin kullanımı stoğunu aşamaz.
- Kesme ve kesmeye hazırlık süresi kesilecek ana malzeme ve sipariş parçalarından bağımsızdır. Sabit bir süredir ve bilinmektedir.
- Her bir parçadan tam talep kadar kesilecektir. Talep karşılandıktan sonra fazladan üretim yapılmayacaktır.
- En küçük ana malzeme boyutları en büyük sipariş parçasına eşit ya da daha büyüktür.

indisler:

- $i, j \in I = \{1, 2, \dots, n\}$ sipariş parçası indisi
 $p \in P = \{1, 2, \dots, m\}$ ana malzeme indisi
 $k \in K = \{1, 2, \dots, q\}$ kesme planı (sıra) indisi
 $r \in R = \{1, 2, \dots, o\}$ sipariş indisi

parametreler:

- L_p : p . ana malzemenin boyu
 W_p : p . ana malzemenin eni
 l_i : i . sipariş parçasının boyu
 w_i : i . sipariş parçasının eni
 s_p : p . ana malzemeden stokta bulunan adet
 t_i : i . sipariş parçasının ait olduğu sipariş
 d_r : r . siparişin teslim zamanı
 d'_i : i . sipariş parçasının teslim zamanı $d'_i = d_{t_i}$
 γ : bir kesme işlemi için hazırlık ve kesme süresi toplamı
 M : yeterince büyük pozitif bir sayı

F_{enb} : bütünleşik modelin ilk amacı (toplam fire) için üst sınır değeri $F_{enb} = \frac{\sum_p W_p}{m} \times \frac{\sum_p L_p}{m} \times \frac{q}{4}$
 T_{enb} : bütünleşik modelin ikinci amacı (toplam gecikme) için üst sınır değeri $T_{enb} = \sum_r (q \gamma - d_r)$

karar değişkenleri:

- z_{ik}^B : i . sipariş parçası k . kesme planında kesilecekse 1, kesilmeyecekse 0.
 π_k : k . kesme planı oluşturulduysa 1, oluşturulmadıysa 0.
 x_i : i . sipariş parçasının ağırlık merkezinin x koordinatı
 y_i : i . sipariş parçasının ağırlık merkezinin y koordinatı
 a_{pk}^B : k . kesme planı için p . ana malzeme seçildi ise 1, seçilmedi ise 0.
 u_i : i . sipariş parçası 90° döndürüldüyse 1, döndürülmediyse 0.
 α_{ij} : i . ve j . sipariş parçalarının enleri toplamının yarısı
 β_{ij} : i . ve j . sipariş parçalarının boyları toplamının yarısı
 $e_{ij}^1, e_{ij}^2, b_{ij}^1, b_{ij}^2$: i . ve j . sipariş parçalarının çakışmama kısıtlarında kullanılan 0-1 karar değişkenleri
 C'_i : i . işin tamamlanma zamanı
 C_r : r . siparişin tamamlanma zamanı
 T_r : r . siparişin gecikme süresi

(M^B) : Bütünleşik matematiksel model

amaç fonksiyonları:

$$\text{enk } f_1^B = (\sum_p \sum_k L_p W_p a_{pk}^B - \sum_i \sum_k l_i w_i z_{ik}^B) \quad (1)$$

$$\text{enk } f_2^B = \sum_r T_r \quad (2)$$

kısıtlar:

$$\sum_k z_{ik}^B = 1 \quad \forall i \quad (3)$$

$$\sum_p a_{pk}^B = \pi_k \quad \forall k \quad (4)$$

$$\sum_i z_{ik}^B \leq n\pi_k \quad \forall k \quad (5)$$

$$\sum_k a_{pk}^B \leq s_p \quad \forall p \quad (6)$$

$$x_i - x_j - \alpha_{ij} + M(3 - z_{ik}^B - z_{jk}^B - e_{ij}^1) \geq 0 \quad \forall i, j | i \neq j, k \quad (7)$$

$$x_j - x_i - \alpha_{ij} + M(3 - z_{ik}^B - z_{jk}^B - e_{ij}^2) \geq 0 \quad \forall i, j | i \neq j, k \quad (8)$$

$$y_i - y_j - \beta_{ij} + M(3 - z_{ik}^B - z_{jk}^B - b_{ij}^1) \geq 0 \quad \forall i, j | i \neq j, k \quad (9)$$

$$y_j - y_i - \beta_{ij} + M(3 - z_{ik}^B - z_{jk}^B - b_{ij}^2) \geq 0 \quad \forall i, j | i \neq j, k \quad (10)$$

$$e_{ij}^1 + e_{ij}^2 + b_{ij}^1 + b_{ij}^2 = 1 \quad \forall i, j | i \neq j \quad (11)$$

$$\frac{l_i(1-u_i)+w_i u_i}{2} \leq y_i \quad \forall i \quad (12)$$

$$\sum_p L_p a_{pk}^B - \frac{l_i(1-u_i)+w_i u_i}{2} \geq y_i - M(1 - z_{ik}^B) \quad \forall i, k \quad (13)$$

$$\frac{w_i(1-u_i)+l_i u_i}{2} \leq x_i \quad \forall i \quad (14)$$

$$\sum_p W_p a_{pk}^B - \frac{w_i(1-u_i)+l_i u_i}{2} \geq x_i - M(1 - z_{ik}^B) \quad \forall i, k \quad (15)$$

$$\alpha_{ij} = \frac{w_i(1-u_i)+w_j(1-u_j)+l_i u_i+l_j u_j}{2} \quad \forall i, j | i \neq j \quad (16)$$

$$\beta_{ij} = \frac{l_i(1-u_i)+l_j(1-u_j)+w_i u_i+w_j u_j}{2} \quad \forall i, j | i \neq j \quad (17)$$

$$C'_i \geq k\gamma z_{ik}^B \quad \forall i, k \quad (18)$$

$$C_r \geq C'_i \quad \forall i, r | t_i = r \quad (19)$$

$$T_r \geq C_r - d_r \quad \forall r \quad (20)$$

$$x_i, y_i, C'_i \geq 0 \quad \forall i \quad (21)$$

$$\alpha_{ij}, \beta_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \quad (22)$$

$$T_r, C_r \geq 0 \quad \forall r \quad (23)$$

$$z_{ik}^B \in \{0,1\} \quad \forall i, k \quad (24)$$

$$u_i \in \{0,1\} \quad \forall i \quad (25)$$

$$a_{pk}^B \in \{0,1\} \quad \forall p, k \quad (26)$$

$$e_{ij}^1, e_{ij}^2, b_{ij}^1, b_{ij}^2 \in \{0,1\} \quad \forall i, j \quad (27)$$

İlk amaç (1) toplam firenin, ikinci amaç (2) ise sipariş gecikmeleri toplamının enküçüklenmesidir. Kısıt (3) her parçanın bir kesme planına atanmasını, kısıt (4) ise oluşturulan her kesme planının kesileceği ana malzemenin seçilmesini sağlar. Kısıt (5), ancak bir kesme planı oluşturulduysa bu kesme planına sipariş parçası atanabilmesine izin verir. Kısıt (6), ana malzeme kullanımının stokları aşmamasını garanti eder. Kısıt (7)-(11) aynı kesme planı için seçilen herhangi iki parçanın çakışmamasını sağlar. Kısıt (12)-(15), kesilecek parçaların x ve y koordinatlarının ana malzemenin eni ve boyu sınırları içerisinde olmasını sağlamaktadır. Kısıt (16), i . ve j . parçaların enlerinin toplamının yarısının hesaplanmasını sağlar. Kısıt (17), i . ve j . parçaların boylarının toplamının yarısının hesaplanmasını sağlar. Kısıt (18), bir parçanın, kısıt (19), bir siparişin tamamlanma zamanının hesaplar. Kısıt (20), siparişlerin gecikmelerini belirler. Kısıt (21)-(27) işaret kısıtlarıdır.

Amaçlar klasik ağırlıklandırma yöntemi ile birleştirilmiştir. Amaçların aynı ölçüğe getirilebilmesi için her iki amaçta üst sınır değerlerine bölünmüştür. Amaçlar eşit öneme sahip olduğundan ağırlıkları 0,5 olarak alınmıştır. Birleştirilmiş amaç fonksiyonu Eşitlik (28)'de verilmiştir.

$$enk f^B = 0,5 \frac{f_1^B}{F_{enb}} + 0,5 \frac{f_2^B}{T_{enb}} \quad (28)$$

3. GELİŞTİRİLEN MATSEZGİSEL ALGORİTMA

Geliştirilen matsezgisel algoritmanın temel mantığı, her seferinde teslim zamanı yaklaşan sipariş parçalarını, seçilen bir ana malzemeye en az fire oluşturacak şekilde yerleştirmek ve bu şekilde bir kesme planı oluşturmaktır. Oluşturulan kesme planında yer alan parçalar hangi siparişe ait iseler ilgili sipariştten düşülmürler. Kullanılan ana malzeme de stoktan düşülmür. Kesilecek parçalar tamamlanana kadar kesme planı oluşturulmaya devam edilir. Algoritmada kesme planı oluşturma alt problemi bir matematiksel model (M^A) ile çözülür. Her seferinde sadece bir kesme planı oluşturulacağından, bütünleşik matematiksel modelin amaç fonksiyonlarının bu modelde doğrudan kullanılabilmesi mümkün değildir. Bu nedenle alt problemin amaç fonksiyonları asıl amaç fonksiyonlarına hizmet edecek şekilde yeniden tasarlanmıştır. Alt problemin ilk amacı seçilen ana malzemenin firesini enküçükleme. Bu amaç bu haliyle ele alındığında kesilmeyen parçaları göz ardı etmektedir. Kalan parçalarında göz önünde bulundurulabilmesi için kalan parçaların alanları toplamı küçük bir katsayı ile çarpılarak ceza olarak amaç fonksiyonuna eklenmiştir. Bu sayede alt problemin kesme planı oluştururken mümkün olduğunca çok sipariş parçası seçmesi sağlanmıştır. Alt problemin ikinci amacı, seçilen parçaların teslim zamanları toplamını enküçükleme. Benzer şekilde yine kalan parçaların göz önünde bulundurulabilmesi için seçilmeyen parçaların teslim zamanları ceza olarak eklenmiştir. Önerilen matsezgisel algoritmada kullanılan parametreler ve algoritmanın adımları aşağıda verilmiştir.

parametreler:

s'_p : p . ana malzemeden stokta kalan adet

μ_i : i . sipariş parçası kesildi ise 1, kesilmedi ise 0.

ρ : çok küçük pozitif sayı (0,001)

τ : pozitif sayı (1000)

Matsezgisel Algoritma

Girdi. Sipariş teslim zamanları (d_r), sipariş parçalarının hangi siparişe ait olduğu (t_i), ana malzeme stok adetleri (s_p) ve bir kesme işleminin süresi (γ).

Adım 0. Kesme planı/sıra indisini (k) sıfır yap, $k = 0$. Sipariş parçalarının teslim zamanlarını (d'_i) ait oldukları siparişin teslim zamanına eşitle, $d'_i = d_{t_i}$. Ana malzemelerin kalan stok adetlerini (s'_p), başlangıç stok adetlerine eşitle, $s'_p = s_p$. Tüm sipariş parçalarını hangi siparişe ait olduklarına göre ilgili V_r kümesine ata. $V_1 \cup V_2 \cup \dots \cup V_o = V$.

Adım 1. Kesme planı/sıra indisini bir arttır. $k = k + 1$. (M^A) modelini çözerek $s'_p > 0$ olan bir ana malzeme (p') seç ve V kümesindeki sipariş parçalarını kullanarak kesme planı k 'yı türet. (M^A) modeli tarafından seçilen sipariş parçalarını k . kesme planına aktar, $z'_{ik} = z_i$. İlgili kesme planının firesini (F_k) hesapla, $F_k = \sum_p L_p W_p a_p - \sum_i l_i w_i z_i$.

Adım 2. Kesme planı k 'da yer alan sipariş parçalarını ilgili V_r kümesinden çıkar. Eğer r . sipariş tamamlandıysa, $V_r = \emptyset$, r . siparişin tamamlanma zamanını (C_r) hesapla, $C_r = k\gamma$. r . siparişin gecikmesini (T_r) hesapla, $T_r = \begin{cases} C_r - d_r & C_r > d_r \\ 0 & C_r \leq d_r \end{cases}$. k . kesme planı için toplam gecikmeyi (θ_k) hesapla, $\theta_k = \sum_r T_r$.

Adım 3. Kullanılan ana malzemenin stoğunu güncelle. $s'_p = s'_p - 1$. Eğer herhangi bir ana malzemeden elde kalmadı ise ($s'_p = 0$) bu ana malzeme sonraki kesme planları için (M^A) modeli tarafından seçilemez.

Adım 4. $V \neq \emptyset$ ise *Adım1*'e git, $V = \emptyset$ ise DUR. Toplam fireyi (F^T) hesapla, $F^T = \sum_k F_k$. Toplam gecikmeyi (θ^T) $\theta^T = \sum_k \theta_k$ formülü ile hesapla. Birleştirilmiş amaç fonksiyonu değerini (z), $z = \frac{F^T}{F_{enb}} + \frac{\theta^T}{T_{enb}}$ formülü ile hesapla.

Çıktı. Kesme planlarının sırası (k), her bir kesme planında hangi sipariş parçalarının yer aldığı (z'_{ik}), siparişlerin tamamlanma zamanları (C_r), gecikme süreleri (T_r), ana malzeme kalan miktarlar (s'_p), toplam fire (F^T) ve toplam gecikme (θ^T).

Önerilen matsezgisel algoritmanın *Adım 1*'inde kullanılan (M^A) modeli için tanımlanan ek karar değişkenleri, modelin amaç fonksiyonları ve kısıtları aşağıda verilmiştir.

karar değişkenleri:

z_i^A : i . sipariş parçası kesilecekse 1, kesilmeyecekse 0.

a_p^A : p . ana malzeme seçildi ise 1, seçilmedi ise 0.

(M^A): *Alt problem*

amaç fonksiyonları:

$$\text{enk } f_1^A = \frac{(\sum_p L_p W_p a_p^A - \sum_i l_i w_i z_i^A)}{(W_{ort} L_{ort} / 2)} + \rho \sum_{i|\mu_i > 0} l_i w_i (1 - z_i^A) \quad (29)$$

$$\text{enk } f_2^A = \frac{\sum_i d_i' z_i}{\sum_{i|\mu_i > 0} d_i'} + \tau \sum_{i|\mu_i > 0} \frac{1}{d_i'} (1 - z_i) \quad (30)$$

kısıtlar:

$$x_i - x_j - \alpha_{ij} + M(3 - z_i^A - z_j^A - e_{ij}^1) \geq 0 \quad \forall i, j | i \neq j \quad (31)$$

$$x_j - x_i - \alpha_{ij} + M(3 - z_i^A - z_j^A - e_{ij}^2) \geq 0 \quad \forall i, j | i \neq j \quad (32)$$

$$y_i - y_j - \beta_{ij} + M(3 - z_i^A - z_j^A - b_{ij}^1) \geq 0 \quad \forall i, j | i \neq j \quad (33)$$

$$y_j - y_i - \beta_{ij} + M(3 - z_i^A - z_j^A - b_{ij}^2) \geq 0 \quad \forall i, j | i \neq j \quad (34)$$

$$e_{ij}^1 + e_{ij}^2 + b_{ij}^1 + b_{ij}^2 = 1 \quad \forall i, j | i \neq j \quad (35)$$

$$\sum_p a_p^A = 1 \quad (36)$$

$$\frac{l_i(1-u_i)+w_i u_i}{2} \leq y_i \quad \forall i \quad (37)$$

$$\sum_p L_p a_{pk}^B - \frac{l_i(1-u_i)+w_i u_i}{2} \geq y_i \quad \forall i \quad (38)$$

$$\frac{w_i(1-u_i)+l_i u_i}{2} \leq x_i \quad \forall i \quad (39)$$

$$\sum_p W_p a_p - \frac{w_i(1-u_i)+l_i u_i}{2} \geq x_i \quad \forall i \quad (40)$$

$$\alpha_{ij} = \frac{w_i(1-u_i)+w_j(1-u_j)+l_i u_i+l_j u_j}{2} \quad \forall i, j | i \neq j \quad (41)$$

$$\beta_{ij} = \frac{l_i(1-u_i)+l_j(1-u_j)+w_i u_i+w_j u_j}{2} \quad \forall i, j | i \neq j \quad (42)$$

$$z_i^A \leq \mu_i \quad \forall i \quad (43)$$

$$a_p^A \leq s_p' \quad \forall p \quad (44)$$

$$x_i, y_i \geq 0 \quad \forall i \quad (45)$$

$$\alpha_{ij}, \beta_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \quad (46)$$

$$z_i^A, u_i \in \{0,1\} \quad \forall i \quad (47)$$

$$a_p^A \in \{0,1\} \quad \forall p \quad (48)$$

$$e_{ij}^1, e_{ij}^2, b_{ij}^1, b_{ij}^2 \in \{0,1\} \quad \forall i, j \quad (49)$$

İlk amaç (29) firenin enküçüklenmesidir. İkinci amaç (30) ise seçilen sipariş parçalarının teslim zamanları toplamının enküçüklenmesidir. Bu amaç gecikmelerin azaltılmasına hizmet etmektedir. Kısıt (31)-(35), dikdörtgen ana malzemeden kesilmek üzere seçilen herhangi iki parçanın çakışmamasını sağlar. Kısıt (36) bir ana malzemenin seçilmesini sağlamaktadır. Kısıt (37)-(40), kesilecek parçaların x ve y koordinatlarının ana malzemenin eni ve boyu sınırları içerisinde olmasını sağlamaktadır. Kısıt (41), i . ve j . parçaların enlerinin toplamının yarısının hesaplanmasını sağlar. Kısıt (42), i . ve j . parçaların boylarının toplamının yarısının hesaplanmasını sağlar. Kısıt (43), sadece henüz kesilmemiş parçaların seçilmesine izin verir. Kısıt (44), sadece stokta kalan ana malzemelerden birisinin seçilmesine izin verilir. Kısıt (45)-(49) işaret kısıtlarıdır.

4. DENEYSEL SONUÇLAR

Farklı boyutlardaki test problemleri, önerilen bütünleşik matematiksel model ve matsezigisel algoritmanın performanslarını göstermek için kullanılmıştır. Tüm testler, GAMS 44.4'ün CPLEX çözücüsü ile 2.40 GHz Intel Core i5 ve 8 GB RAM'e sahip bir bilgisayarda çözülmüştür. Çözüm süresi 10800 saniye ile sınırlandırılmıştır.

4.1. Oyuncak Problem

11×13 ve 15×15 ebatlarına sahip iki ana malzemeden 6 farklı boyuta sahip sipariş parçaları kesilecektir. Üreticinin elinde birinci ana malzemeden 1 adet ikinci ana malzemeden ise 3 adet mevcuttur. Sipariş parçalarının en (w_i) ve boyları (l_i) Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Sipariş parçalarının en ve boyları

i	w_i	l_i
1	2	5
2	6	9
3	5	13
4	3	4
5	4	9
6	5	13

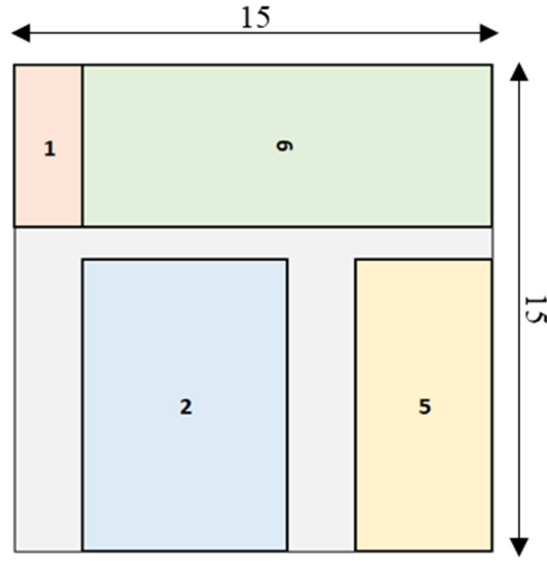
Çizelge 2'de verilen sipariş parçalarının her biri bir siparişe aittir. Bu oyuncak problemde toplam üç sipariş bulunmaktadır. Birinci sipariş; sipariş parçası 1 ve 2, ikinci sipariş; sipariş parçası 3 ve 4, üçüncü sipariş; sipariş parçası 5 ve 6'dan oluşmaktadır. Siparişlerin teslim zamanları sırasıyla, 20, 35 ve 30'dur. Her bir kesme işlemi için hazırlık ve kesme süresi toplamı sabit olup 20'dir.

Oyuncak problem hem önerilen bütünleşik model hem de matsezigisel algoritma ile çözülmüştür. Bütünleşik model ile 4,31 saniye de eniyi çözüme ulaşılmıştır. Toplam fire 126 ve toplam gecikme 5 olarak elde edilmiştir. Siparişler iki kesme planı oluşturularak tamamlanmıştır. Oluşturulan ilk kesme planında sipariş parçalarının ağırlık merkezlerinin koordinatları Çizelge 3'de, kesme planı ise Şekil 1'de verilmiştir.

Çizelge 3. İlk kesme planında sipariş parçalarının ağırlık merkezlerinin koordinatları

i	x_i	y_i
1	1,0	2,5
2	5,0	10,5
5	13,0	10,5
6	8,5	2,5

Çizelge 3'ten de görülebileceği gibi ilk kesme planında 1, 2, 5 ve 6 numaralı sipariş parçaları yer almıştır. İlk kesme planı kesildiğinde, 1. ve 2. sipariş parçalarından oluşan birinci sipariş ve 5. ve 6. sipariş parçalarından oluşan üçüncü sipariş tamamlanmıştır. Her iki siparişin tamamlanma zamanları 20 olarak gerçekleşmiş ve gecikme yaşanmamıştır. Şekil 1'den görülebileceği gibi ilk kesme planı 15×15 ebatlarına sahip ikinci ana malzemeden kesilmiştir. 6. sipariş parçası kesme planına 90 derece döndürülerek yerleştirilmiştir.



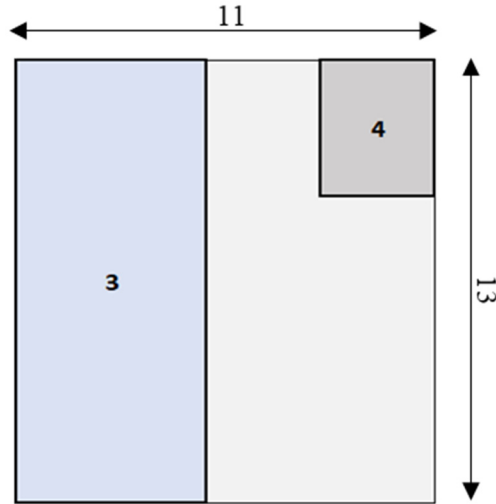
Şekil 1. Bütünleşik model ile elde edilen ilk kesme planı

Oluşturulan ikinci kesme planında sipariş parçalarının ağırlık merkezlerinin koordinatları Çizelge 4’de, kesme planı ise Şekil 2’de verilmiştir.

Çizelge 4. İkinci kesme planında sipariş parçalarının ağırlık merkezlerinin koordinatları

i	x_i	y_i
3	2,5	6,5
4	9,5	2,0

Çizelge 4’den de görüldüğü üzere, ikinci kesme planında 3 ve 4 numaralı sipariş parçaları yer almıştır. İkinci kesme planı kesildikten sonra 4. ve 5. sipariş parçalarından oluşan ikinci sipariş tamamlanmıştır. Sipariş tamamlanma zamanı 40 olarak gerçekleşmiş ve sipariş 5 birim gecikmiştir. Şekil 2’den de görülebileceği gibi, ikinci kesme planı 11×13 ebatlarına sahip birinci ana malzemeden kesilmiştir.



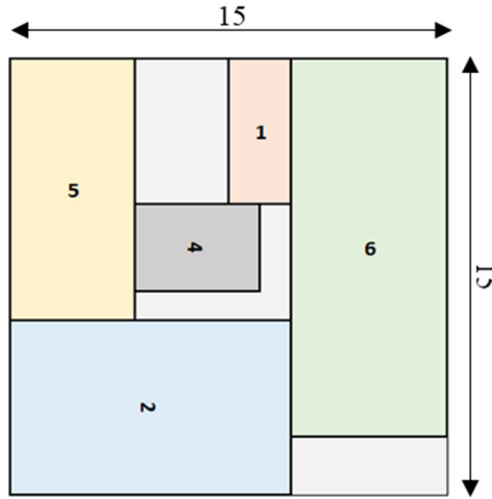
Şekil 2. Bütünleşik model ile elde edilen ikinci kesme planı

Oyuncak problem, matsezgisel algoritma ile çözülmüş ve 0,11 saniyede eniyi çözüme ulaşılmıştır. Bütünleşik modelde olduğu gibi siparişler iki kesme planı oluşturularak tamamlanmıştır. Oluşturulan ilk kesme planında sipariş parçalarının ağırlık merkezlerinin koordinatları Çizelge 5’de, kesme planı ise Şekil 3’de verilmiştir.

Çizelge 5. İlk kesme planında sipariş parçalarının ağırlık merkezlerinin koordinatları

i	x_i	y_i
1	9,0	2,5
2	4,5	12,0
4	6,0	6,5
5	2,0	4,5
6	12,5	6,5

Çizelge 5’de de verildiği üzere, ilk kesme planında 1, 2, 4, 5 ve 6 numaralı sipariş parçaları yer almıştır. Toplam fire 126 ve toplam gecikme 5 olarak elde edilmiştir. Şekil 3’den de görülebileceği gibi, bu kesme planı 15×15 ebatlarına sahip ikinci ana malzemeden kesilmiştir. 2. ve 4. sipariş parçaları kesme planına 90 derece döndürülerek yerleştirilmiştir.

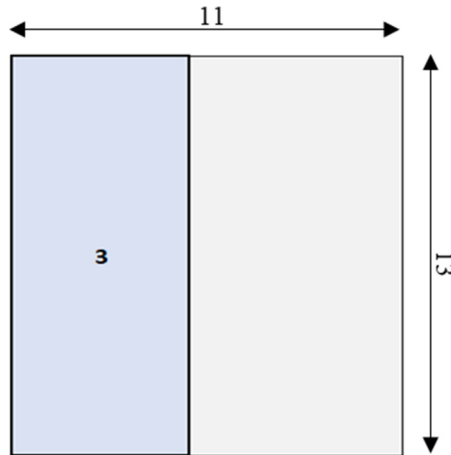
**Şekil 3.** Matsezgisel algoritma ile elde edilen ilk kesme planı

Oluşturulan ikinci kesme planında sipariş parçasının ağırlık merkezlerinin koordinatları Çizelge 6’da, kesme planı ise Şekil 4’de verilmiştir.

Çizelge 6. İkinci kesme planında sipariş parçalarının ağırlık merkezlerinin koordinatları

i	x_i	y_i
3	2,5	6,5

Çizelge 6’dan da görülebileceği gibi, ikinci kesme planında 3 numaralı sipariş parçası yer almıştır. Şekil 4’den görüldüğü üzere, bu kesme planı 11×13 ebatlarına sahip birinci ana malzemeden kesilmiştir. 3. sipariş parçası kesme planında döndürülmeden yer almıştır.

**Şekil 4.** Matsezgisel algoritma ile elde edilen ikinci kesme planı

Her ne kadar hem matematiksel model hem de matsezgisel algoritma ile eniyi çözüme ulaşılmış ve aynı amaç fonksiyonu değeri elde edilmiş olsa da, matsezgisel algoritmanın her kesme planına mümkün olduğunca çok sipariş parçası sığdırma çabası ilk kesme planlarının daha az fireli olmasını sağlamakta firenin önemli bir kısmı son kesme planında oluşmaktadır. Bu da kalan firenin daha sonra başka sipariş parçalarının kesilmesinde kullanılabilme şansı yaratmaktadır.

4.2. Test Problemleri

Önerilen bütünleşik matematiksel modelin ve matsezgisel algoritmanın performanslarını değerlendirebilmek için toplam 12 test problemi türetilmiştir. n , o , t_i , l_i ve w_i parametrelerinin değerleri, Beasley [15]'nin OR Kütüphanesi'ndeki ngcutinfo adlı 2, 4, 6, 8, 10 ve 12 numaralı test problemlerinden alınmıştır. m , L_p ve W_p 'de Beasley [15]'in test problemleri dikkate alınarak türetilmiştir. s_p değerleri, Eşitlik (50)'de verilen formülasyon ile hesaplanmıştır. γ değeri 50 olarak alınmıştır. q değerleri ise Eşitlik (51)'de verilen formülasyon ile hesaplanmıştır. d_r parametre değerleri $[1, q \gamma]$ aralığında kesikli düzgün dağılıma uygun olarak türetilmiştir.

$$s_p = \left\lceil \frac{(\sum_i l_i w_i)^2}{m L_p W_p} \right\rceil \quad \forall p \quad (50)$$

$$q = \left\lceil \frac{\sum_i l_i w_i}{enk_p(L_p W_p)} \right\rceil \quad (51)$$

Test problemleri, *TP-örnek numarası-m* şeklinde adlandırılmıştır. Örneğin *TP-1-2* adlı test problemi iki çeşit ana malzemenin olduğu ilk test problemini ifade etmektedir. Test problemlerinin özellikleri Çizelge 7'de verilmiştir. Bu çizelge dört sütundan oluşmaktadır. İlk sütunda test problemi ismi, ikinci sütunda ana malzemelerin ebatları (L_p, W_p), üçüncü sütunda sipariş sayısı (o) ve son sütunda ise kesilecek sipariş parça sayısı (n) verilmiştir.

Çizelge 7. Test problemlerinin özellikleri

<i>Test problemi</i>	(L_p, W_p)	o	n	<i>Test problemi</i>	(L_p, W_p)	o	n
<i>TP-1-2</i>	(10,10) (30,30)	5	7	<i>TP-4-2</i>	(10,10) (30,30)	7	17
<i>TP-1-4</i>	(10,10) (15,10) (20,20) (30,30)	5	7	<i>TP-4-4</i>	(10,10) (15,10) (20,20) (30,30)	7	17
<i>TP-2-2</i>	(10,10) (30,30)	7	13	<i>TP-5-2</i>	(30,30) (40,40)	5	13
<i>TP-2-4</i>	(10,10) (15,10) (20,20) (30,30)	7	13	<i>TP-5-4</i>	(30,30) (35,30) (35,35) (40,40)	5	13
<i>TP-3-2</i>	(10,10) (30,30)	10	15	<i>TP-6-2</i>	(30,30) (40,40)	10	22
<i>TP-3-4</i>	(10,10) (15,10) (20,20) (30,30)	10	15	<i>TP-6-4</i>	(30,30) (35,30) (35,35) (40,40)	10	22

4.2. Test Sonuçları

Test problemleri önerilen bütünleşik model ve matsezgisel algoritma ile çözülmüştür. Elde edilen çözümler, Çizelge 8'de verilmiştir. Tablo üç bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde test problemlerinin isimleri, ikinci ve üçüncü bölümlerde ise sırasıyla bütünleşik model ve matsezgisel algoritma ile elde edilen toplam fire (f_1), toplam sipariş gecikmesi (f_2) ve çözüm süresi (*süre*) değerleri yer almaktadır.

Çizelge 8. Test problemlerinin sonuçları

Problem	Bütünleşik model			Matsezigisel algoritma		
	f_1	f_2	süre(sn.)	f_1	f_2	süre(sn.)
<i>TB-1-2</i>	738	25	0,12	738	25	0,22
<i>TB-1-4</i>	88	25	0,86	238	25	0,80
<i>TB-2-2</i>	267	36	33,97	267	36	1,03
<i>TB-2-4</i>	167	79	10800	267	36	2,88
<i>TB-3-2</i>	610	71	1,64	610	71	0,56
<i>TB-3-4</i>	60	74	10800	110	71	15,19
<i>TP-4-2</i>	23	216	10800	623	154	6,38
<i>TB-4-4</i>	73	179	10800	123	154	37,28
<i>TB-5-2</i>	780	57	10800	780	57	500,14
<i>TB-5-4</i>	230	137	10800	780	133	500,13
<i>TP-6-2</i>	204	262	10800	904	161	500,25
<i>TB-6-4</i>	354	65	10800	354	42	500,28

Çizelge 8'den de görülebileceği gibi, matematiksel model ve matsezigisel algoritma ile elde edilen çözümler baskınlık açısından değerlendirilmiş ve baskın çözümler koyu renk ile işaretlenmiştir. Sadece *TB-1-2* problemi için matematiksel modelle elde edilen çözüm matsezigisel çözümüne zayıf baskındır. *TB-6-4* problemi için ise matsezigisel algoritma ile elde edilen çözüm matematiksel model çözümüne zayıf baskındır. Diğer tüm problemler için elde edilen çözümler birbirine baskın değildir. Dolayısıyla çözüm kalitesi açısından değerlendirildiğinde her iki çözüm yaklaşımının da problemlerin %92'sinde başarılı olduğu görülmektedir. Parça sayısının 13 ve üzerine çıktığı test problemlerinde bütünleşik modelin çözüm süresinin çok arttığı ve süre limiti ile durduğu görülmektedir. Ancak matsezigisel algoritma tüm problemler için en fazla 500 sn. içinde başarılı çözümlere ulaşmıştır. Çözüm süresi açısından karşılaştırma yapıldığında özellikle problem boyutu büyüdükçe matsezigisel algoritmanın önemli bir avantaja sahip olduğu görülmektedir. Matsezigisel algoritma matematiksel modele kıyasla ortalama %72 daha kısa sürede başarılı çözümlere ulaşabilmiştir. Özetle, küçük boyutlu problemler için bütünleşik modelin, 13 ya da daha fazla sipariş parçasına sahip daha büyük boyutlu problemler için ise geliştirilen matsezigisel algoritmanın kullanılması önerilmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, siparişlerin teslim zamanlarının dikkate alındığı iki boyutlu kesme ve çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Ayrıca farklı boyutlarda ana malzemelerin olduğu ve sipariş parçalarının 90° dönmesine izin verildiği durumlarda göz önünde bulundurulmuştur. Ele alınan problemin çözümü için fire miktarının ve siparişlerin teslim zamanının enküçüklenmesini amaçlayan bütünleşik çok amaçlı bir matematiksel model ve bir matsezigisel algoritma önerilmiştir. Önerilen modelin ve algoritmanın performanslarını gösterebilmek için farklı boyutlarda test problemleri çözülmüştür. Elde edilen çözümler incelendiğinde, hem önerilen model hem de algoritma ile problemlerin %92'sine başarılı çözümler bulunmuştur. Önerilen model, küçük boyutlu problemler için makul sürede yüksek kaliteli çözümler bulabilmektedir ancak problem boyutu arttıkça çözüm süresinde artmaktadır. Bu nedenle büyük boyutlu problemlerin çözümü için ayrıca bir matsezigisel algoritmada geliştirilmiştir. Yapılan deneyler önerilen matsezigisel algoritmanın çözüm süresini ortalama %72 kısalttığını ve özellikle büyük boyutlu problemleri makul süreler içinde başarıyla çözebildiğini göstermiştir. Bu sayede, matsezigisel algoritma çözüm süresi açısından işletmelere önemli bir katkı sağlayacaktır. Gelecekte, teslimat süreleri gerçek dünya belirsizliklerini daha iyi yansıtmak için stokastik olarak modellenebilir. Dinamik talep koşulları, kalite kontrol gereksinimleri ve yalnızca malzeme israfını değil aynı zamanda enerji tüketimini de en aza indirmeye odaklanan hedefler gibi ek özellikler de problem çerçevesine dahil edilebilir. Ek olarak, ele alınan problemin çözümü için melez algoritmalar ve makine öğrenimi tabanlı sezgisel yöntemler dahil olmak üzere gelişmiş optimizasyon tekniklerini kullanan yeni çözüm yaklaşımları geliştirilebilir.

6. KAYNAKLAR

1. Souza Queiroz, L.R.D. & Andretta, M. (2022). A branch-and-cut algorithm for the irregular strip packing problem with uncertain demands. *International Transactions in Operational Research*, 29(6), 3486-3513.
2. Tsao, Y.C., Delicia, M. & Vu, T.L. (2022). Marker planning problem in the apparel industry: Hybrid PSO-based heuristics. *Applied Soft Computing*, 123, 108928.
3. Yang, Y., Liu, B., Li, X., Jia, Q., Duan, W. & Wang, G. (2024). Fidelity-adaptive evolutionary optimization algorithm for 2D irregular cutting and packing problem. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1-19.
4. Baldacci, R. & Boschetti, M.A. (2007). A cutting-plane approach for the two-dimensional orthogonal non-guillotine cutting problem. *European Journal of Operational Research*, 183(3), 1136-1149.
5. Russo, M., Boccia, M., Sforza, A. & Sterle, C. (2020). Constrained two-dimensional guillotine cutting problem: upper-bound review and categorization. *International Transactions in Operational Research*, 27(2), 794-834.
6. Goncalves, J.F. & Wascher, G. (2020). A mip model and a biased random-key genetic algorithm based approach for a two-dimensional cutting problem with defects. *European Journal of Operational Research*, 286(3), 867-882.
7. D'Amato, J.P., Mercado, M., Heiling, A. & Cifuentes, V. (2016). A Proximal optimization method to the problem of nesting irregular pieces using parallel architectures. *Revista Iberoamericana De Automatica E Informatica Industrial*, 13(2), 220-227.
8. Chen, Q. & Chen, Y. (2024). Heuristics for the two-dimensional cutting stock problem with usable leftover. *Intelligent Data Analysis, (Preprint)*, 1-21.
9. Nascimento, D.N., Cherri, A.C., Oliveira, J.F. & Oliveira, B.B. (2023). The two-dimensional cutting stock problem with usable leftovers and uncertainty in demand. *Computers & Industrial Engineering*, 186, 109705.
10. Arbib, C., Marinelli, F. & Pizzuti, A. (2021). Number of bins and maximum lateness minimization in two-dimensional bin packing. *European Journal of Operational Research*, 291(1), 101-113.
11. Polyakovskiy, S. & M'Hallah, R. (2021). Just-In-Time Two-Dimensional Bin Packing. *Omega*, 102, 102311.
12. Virk, A.K. & Singh, K. (2019). Application of nature inspired algorithms to optimize multi-objective two-dimensional rectangle packing problem. *Journal of Industrial Integration and Management*, 4(4), 1950010.
13. Demir, Y. (2024). An iterated greedy algorithm for the planning of yarn-dyeing boilers. *International Transactions in Operational Research*, 31(1), 115-139.
14. Polyakovskiy, S. & M'Hallah, R. (2018). A hybrid feasibility constraints-guided search to the two-dimensional bin packing problem with due dates. *European journal of operational research*, 266(3), 819-839.
15. Braga, N., Alves, C., Macedo, R. & de Carvalho, J.V. (2015). A model-based heuristic for the combined cutting stock and scheduling problem. In *Computational Science and Its Applications-ICCSA 2015: 15th International Conference, Banff, AB, Canada, June 22-25, 2015, Proceedings, Part II* 15, 490-505.
16. Bennell, J.A., Lee, L.S. & Potts, C.N. (2013). A genetic algorithm for two-dimensional bin packing with due dates. *International Journal of Production Economics*, 145(2), 547-560.
17. Li, S. (1996). Multi-job cutting stock problem with due dates and release dates. *Journal of the Operational Research Society*, 47(4), 490-510.
18. Beasley, J.E. (1985). An exact two-dimensional nonguillotine cutting tree search procedure. *Operations Research*, 33, 49-64.



Production of Organo-Modified and Amino-Functional Silicone Finishing Chemicals and Their Effects on The Handle and Color Values of Cotton Knitted Fabrics

Aslıhan KORUYUCU^{1,a}

¹Namık Kemal University, Faculty of Engineering, Department of Textile Engineering, Tekirdag, Türkiye

^aORCID: 0000-0002-8443-5188

Article Info

Received : 14.06.2024

Accepted : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665970

Corresponding Author

Aslıhan KORUYUCU

adelituna@nku.edu.tr

Keywords

Cotton knitted fabric

Organo modified and amino-functional silicone finishing chemicals

Handle

CIELab color values

How to cite: KORUYUCU, A., (2025).

Production of Organo-modified and Amino-Functional Silicone Finishing Chemicals and Their Effects on The Handle and Color Values of Cotton Knitted Fabrics. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(1), 193-204.

ABSTRACT

In this study, silicone finishing chemicals were produced using organo-modified, amino-functional silicone oils and polar additives (polyethyleneglycol). Silicone emulsions are affected by many factors. These are the type of oil used when producing silicone softener emulsions, the ratio of emulsifiers, hydrophile-lipophile balance (HLB) values of emulsifiers, particle size of the silicone finishing chemicals produced, and viscosity of silicone emulsions. After the application, quantitative handle, soft feel, particle size analyzes of the prepared silicone finishing chemicals, CIELab color, and Berger whiteness index measurements were evaluated. As a result, organo-modified and amino-functional silicone finishing chemicals caused the handle, softness properties, and color differences in cotton knitted fabrics. The large particle size of emulsions caused the large color difference, which is calculated from the changes in color coordinates. The main factor affecting the softening (quantitative behavior) of fabric samples applied with silicone finishing chemicals is the number of amino groups. At pH 5.5, the better handle and softness properties were obtained as more secondary amine groups were ionized. The particle size and viscosity of silicone finishing chemicals have an effect on the handle of fabric samples.

Organo Modifiye ve Amino Fonksiyonel Silikon Apre Kimyasallarının Üretimi ve Pamuklu Örme Kumaşların Tuşe ve Renk Değerlerine Etkisi

Makale Bilgileri

Geliş : 14.06.2024

Kabul : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665970

Sorumlu Yazar

Aslıhan KORUYUCU

adelituna@nku.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Pamuklu örme kumaş

Organo-modifiye ve amino-fonksiyonel silikon apre kimyasalları

Tutum

CIELab renk değerleri

Atıf şekli: KORUYUCU, A., (2025).

Organo Modifiye ve Amino Fonksiyonel Silikon Apre Kimyasallarının Üretimi ve Pamuklu Örme Kumaşların Tuşe ve Renk Değerlerine Etkisi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(1), 193-204.

ÖZ

Bu çalışmada organo-modifiye ve amino-fonksiyonel silikon yağları ve polar katkı maddeleri (polietilenglikol) kullanılarak silikon bitim kimyasalları üretilmiştir. Silikon emülsiyonları, birçok faktörden etkilenir. Bunlar, silikon yumuşatıcı emülsiyonları üretilirken kullanılan yağın cinsi, emülgatörlerin oranı, emülgatörlerin hidrofil-lipofil denge (HLB) değerleri, üretilen silikon emülsiyonlarının parçacık boyutları ve silikon emülsiyonlarının viskozitesidir. Uygulama sonrasında kantitatif tutum, yumuşaklık hissi, hazırlanan silikon emülsiyonlarının partikül boyut analizleri, CIELab renk ve Berger beyazlık indeksi ölçümleri değerlendirilmiştir. Sonuç olarak organo modifiye ve amino fonksiyonlu silikon apre kimyasallarının pamuklu örme kumaşlarda tuşe, yumuşaklık özellikleri ve renk farklılıklarına neden olduğu görülmüştür. Emülsiyonların büyük parçacık boyutu, renk koordinatlarındaki değişikliklerden hesaplanan büyük renk farkına neden olmuştur. Silikon apre kimyasalları uygulanan kumaş numunelerinin yumuşamasını (kantitatif davranışını) etkileyen ana faktör amino grup sayısıdır. pH 5.5'te daha fazla ikincil amin grubu iyonize edildiğinden daha iyi tutum ve yumuşaklık özellikleri elde edilmiştir. Silikon bitim kimyasallarının parçacık boyutu ve viskozitesi, kumaş numunelerinin tutumu üzerinde etkiye sahiptir.

1. INTRODUCTION

Cotton has a good handle and moisture absorption properties. The knitted fabric properties depend on many factors, from the fiber properties to the structural properties of the yarn. The moisture properties of knitted fabrics depend on the fibre type, fibre fineness, yarn type, yarn twist, fabric structure, and surface finishing [1-3].

Due to the hydrophilic characteristics of cotton fibres, cotton knitted fabrics have better moisture transmission properties. The minimum wet radius value for the top and bottom surfaces reflects good moisture transport properties and a feeling of dryness. The high hygroscopic property of the fabric increased moisture absorption and allowed sweat to dry faster from the skin [4,5]. 100% cotton knitted fabrics have a longer wetting time and slower absorption rate.

Softeners provide surface softness by reducing the friction coefficient between fibers, and improve the wear feeling of textile materials [6].

Silicones have hydrophobic properties, elasticity, and film-forming ability due to the low interaction between Si-O-Si and methyl groups. Silicones with groups such as amino alkyls show super softness and durability properties. These silicones are cross-linked to fibers by electrostatic forces and H bonds [7-9].

The softening effect of silicones depends on their amino groups. For pure cotton, the amine number is important. Particle size and viscosity have little effect [10,11]. Amines are a class of nitrogen-containing compounds used as dyes, polymers, and surfactants. Amino-functional silicones react with amino epoxy groups to reduce yellowing.

Amino functional silicones provide the feature to knitted fabrics with weak acid bath. After applying amino silicone softener, the fabrics become slightly yellowed. Ethylene amines are used to obtain a soft handle [12].

Amino functional silicones showed softness and lubrication effect on polar fibers and did not cause any change in the tone of the dyed fabric [13]. Amino silicone emulsions are sensitive to changes in bath pH. In an acidic environment, amino groups have a positive charge and form an ammonium ion structure. This group determines the stability of the emulsion. When the ammonium groups lose a proton in the alkaline bath, the polarity of the silicone decreases, and the stability of the emulsion decreases [14].

Poly-ethoxylated amino silicone compounds have good absorption properties with the amino groups in their structure. Amino silicones are most used in textile applications. They provide permanent softness to the fabric [15].

Organo silicone compounds are polymeric materials and consist of a silicon-oxygen chains and hydrocarbon radicals. Organo-silanes have been used in various applications such as adhesion or the surface modification. Organofunctional silicones contain different groups: for instance, $-NH_2$, $-CH-CH_2-O-$ (epoxy), $-NR_3^+$, Cl^- , $-COOH$, $-NHCOR$. Modified silicone materials indicate the hydrophilicity of finished products. They have amino groups and high softness properties [16].

Textile finishing chemicals such as micro ($<0.01\mu m$) and macro ($<0.1\mu m$) have a milky feature [17].

2. REVIEW OF LITERATURE

There are some research works, where different types of silicone emulsions are used in cotton knitted fabrics.

In studies [18,19], the organo-modified silicones were used. Reactivity and permanent softness were achieved with silicone copolymers containing hydrophilic groups such as polyalkylene oxide, amine, amide, or epoxy groups.

In studies [20,21], the amino silicone based softeners were prepared with different emulsifiers. Amino silicone hydrophobic film was applied to cotton and cotton/polyester blend fabrics by a coating process. The polar silicone-oxygen bond was attached to the cotton fabric surface, and the silicone containing methyl group formed a hydrophobic layer on the fabric surface [20]. Fixation of the amino-functional silicone softener onto the cellulose structure enhanced the extent of crosslinking, provided high softness and roughness decreased as the strength increased. Acceptable rubbing fastness results were achieved without losing softness and permanent handle. The modified amine derivatives, such as amino ethyl, amino propyl functional silicones, provided good softness and less yellowing due to their weaker interactions with the fibers [21].

In study [22], the amino-modified silicone oil was synthesized by bulk polymerization. The amino value in the emulsion was measured as 0.71 mmol/g. Amino modified silicone emulsion had a non-ionic character. The handle (softness) property of the finished cotton knitted fabric was 5. In the softness test, the scale was changed from 1 to 8, that 8 is the best softness and 1 is the harshest.

In studies [23, 24], the amino functional silicones were used. They formed hydrophobic film on the fabric surface owing to strong dipole–dipole hydrogen bonding and electrostatic interactions with cellulosic fibres.

The pH of the bath affected the softening properties of aminoalkyl functional siloxanes [25]. The softening mechanism of aminoalkyl functional siloxanes was studied by molecular interaction. Softening mechanisms included the interactions of aminoalkyl siloxane softeners with fiber. The amino groups become cationic ($-\text{NH}_3^+$) in acidic conditions and a strong bond with the fabric was formed through ionization. The structure and particle sizes of mono-aminoalkyl siloxane polymer emulsions varied with pH. At pH 6.0, amino groups become cationic ($-\text{NH}_3^+$), and one end group ionized. When the pH was greater than 8, softness increased due to the change in the molecular structure of the cotton fiber.

Silicone softeners were synthesized in three different chemical ratios and applied to knitted and woven cotton fabrics [26]. Various tests were carried out such as solid content, stability, fabric whiteness, tensile strength and absorbency. As a result, it was determined that the best silicone softener increased the softness of the fabric and imparted it less absorbent.

In this study [27], silicone oil was stabilized into nano or micro droplets by surfactant and guar gum. As a result, it was determined that the use of HP-guar depended on the silicone concentration.

In this study [28], the effects of the silicone emulsions at different particle sizes on the performance of 100 % cotton knitted fabrics were examined. The silicone emulsions were applied to knitted fabric samples by padding and exhausting methods. After treatments, CIELab, Berger whiteness index values, and particle sizes were measured. After these tests, the change on the performance of the fabric samples was evaluated depending on the particle size and the chemical structures of the silicone oils.

The effects of six types of softeners on the handle properties and washing durability of cotton and bamboo knitted fabrics were investigated [29]. The washing durability of the softeners was tested after 5, 10 and 20 washes.

In this study, organo-modified and amino-functional polysilicone finishing chemicals were prepared using different structures of silicone oils and polar additives. The prepared emulsions were applied to 100% cotton (30/1 Ne) knitted fabric samples according to the impregnation-drying method. The effects of emulsifier ratio, amino group content, and particle sizes of silicone emulsions on the softness (handle) and color values of cotton knitted fabrics were examined. The color values and hand feeling of the treated fabrics were evaluated.

3. MATERIALS AND METHODS

In this study, the production of organo-modified and amino-functional finishing silicone chemicals and their effects on the softness and color values of cotton knitted fabrics were examined.

3.1. Materials

100% cotton (30/1 Ne) knitting fabric as a t-shirt (265 g/m²) was employed in this study. Organo-modified and amino-functional silicone oils were supplied by Terrasilicone, and additives (alcohol ethoxylates (IT3, IT6, IT12) (polar auxiliaries) were supplied by Denge Chemistry.

3.2. Preparation of Organo-Modified and Amino-Functional Silicone Emulsion Recipes

To evaluate the effects of organo-modified and amino-functional finishing chemicals on post-application softness and color values in 100% cotton single jersey fabric samples, 14 different oil-in-water-based finishing silicone chemical recipes were prepared by using organo-modified and amino-functional silicone oils. 14 different oil-in-water-based finishing chemical recipes were indicated in Table 1.

Table 1. Organo-modified and amino-functional finishing chemical recipes*

	Water	IT3-emulsifier	IT6-emulsifier	IT12-emulsifier	Oil	Defoamer	Protective chemical	pH
R1	45.6	1.5		2.5	50	0.3	0.1	5.5
R2	43.6	2.3		3.7	50	0.3	0.1	5.5
R3	45.6		3.22	0.78	50	0.3	0.1	5.5
R4	43.6		4.83	1.17	50	0.3	0.1	5.5
R5	45.6	0.92		3.08	50	0.3	0.1	5.5
R6	43.6	1.38		4.62	50	0.3	0.1	5.5
R7	45.6		1.93	2.07	50	0.3	0.1	5.5
R8	45.6	1.5		2.5	50	0.3	0.1	5.5
R9	45.6		1.93	2.07	50	0.3	0.1	5.5
R10	45.6	0.92		3.08	50	0.3	0.1	5.5
R11	43.6	1.38		4.62	50	0.3	0.1	5.5
R12	43.6	2.3		3.7	50	0.3	0.1	5.5
R13	43.6		4.83	1.17	50	0.3	0.1	5.5
R14	45.6		3.22	0.78	50	0.3	0.1	5.5

*Organo-modified silicone oil was used in (R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7) and also amino-functional silicone oil was used in (R8, R9, R10, R11, R12, R13, R14)

In this study, IT3, IT6, and IT12 alcohol ethoxylates polar additives in each recipe were dissolved in water for 5 min at 1000 rpm. Then, 50% organo-modified and amino-functional oil were added and mixed for 20 min at 1000 rpm. After, 0.3% defoamer was added to finishing silicone emulsion and mechanically mixed for 2 min at 1000 rpm. Then, 45.6 % and 43.6 % water were added very slowly and mixed mechanically at 800 rpm for 10 min to obtain the desired fluidity. After, 0.1% protective chemical was added and mixed for 5 min at 500 rpm. Finally, the acetic acid was added to adjust the emulsion pH to 5.5 and mixed at 500 rpm to make a fully homogeneous solution.

3.3. Treatment of Cotton Knitting Fabric with Organo-Modified and Amino-Functional Finishing Silicone Chemicals

The organo-modified and amino-functional finishing silicone chemicals were applied to 100% cotton (30/1 Ne) knitted fabrics using a laboratory padder (padding method). 60g/l solution of macro silicone finishing chemicals was applied to grey-colored fabric samples by padder with 90.9% pick-up, and the fabric samples were dried at 100°C for 5 min and cured at 150°C for 5 min. Firstly, the pH of the finishing silicone chemicals was adjusted to 5.5 by using acetic acid. Secondly, the color values, color change, softness, and particle size of finishing silicone chemicals were measured.

3.4. Testing and Analysis

In order to determine the effect of finishing silicone chemicals prepared by additives on the softness and color values of cotton knitted fabrics were tested.

Color measurement was evaluated using a reflectance spectrophotometer according to AATCC 173. 100% cotton knitted fabric without finishing silicone chemical was used as a zero reference sample. CIELab coordinates L*(lightness), a*(red-green axis) and b*(yellow blue axis), C*(chroma), the total color difference (ΔE^*), K/S (color strength) and Berger white index values were obtained from color measuring. Four reflectance measurements were made on each finishing silicone chemical emulsions and the averages of the reflectance values (%) at wavelengths between 400 and 700 nm were obtained.

The particle size of prepared finishing chemicals was measured by a laser particle size analyzer. The particle sizes of macro finishing chemicals were between 150 and 250 nm. In fact, particle sizes of the macroemulsion finishing silicone chemicals were higher, they were deposited on the yarn surface. Macroemulsion finishing silicone chemicals reduced the friction coefficient between fibers to obtain the surface softness [29]. Handle expressed as the quantitative sensory evaluation of fabric samples. Organo-modified and amino-functional silicone emulsions were diluted at 60g/L and the hue changes and Berger whiteness index of dyed knitted fabrics before and after application were compared according to standard test method [30].

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1. Softness of Treated Cotton Knitted Fabrics

The handle effects with softness depend not only on the chemical character but also on their position in the textile. If the softener was penetrated into the yarn, a secondary handle effect was obtained. The macro finishing silicone chemicals consist of particles with a diameter of greater than 150. Macro finishing chemicals provided a very pleasant surface smoothness with a soft voluminous handle to the fabric samples. In this study, the fabric handle was evaluated through subjective assessment by people. 10 researches from the textile and clothing sectors were chosen for fabric handle evaluation. The tests were fulfilled in standard atmosphere conditions ($20 \pm 2^\circ\text{C}$ temperature and $65 \pm 4\%$ relative humidity). 20×20 cm fabric samples were prepared for subjective test method. The researchers made an assessment using a 5-point scale. The softness rating numbers for scale were given in Table 2.

Table 2. Softness rating numbers for scale

Sensory attribute	Rating number
Softness/Stiffness	1-stiffest.....5-softest

In the subjective evaluation procedure, softness-stiffness is related to bending. Fabrics that can be bent easily have been described as soft. During evaluation, researchers held the fabric between their thumbs and palms. While the four fingers of the hand were moving, the durability of the fabric was evaluated. The more resistance, the stiffer the fabric. Low resistance showed that the fabric was soft [31]. Researchers were asked to rate the softness/stiffness of the fabric samples between 5 and 1; 5 being the best and 1 being the worst. After the hand evaluation of the researchers, the softness/stiffness degree of the fabric sample treated with the R8 recipe corresponded to 5 (the best), while the softness/stiffness degree of the untreated fabric sample corresponded to 1(the worst). The other samples were rated by the researchers according to this hand evaluation scale. The corresponding ratings were presented in Table 2. The ratings which did not correspond to exact hand feeling were presented as “in the middle ratings”, i.e., “between 3 and 4”.

Reactive silicones were preferred to obtain a super soft handle. Amino or quaternary functional silicones were superior in hand. Quaternary ammonium groups improved softness and increased bath stability against electrolytes. Amino propyl silicones performed a soft handle. Non-yellowing amino silicone structures can be produced such as alkylation or the N-atom in a ring structure.

When the effect of the applied organo-modified finishing chemical emulsions strength (different structure of emulsifier in recipes) on dyed cotton knitted fabrics was examined, it could be seen that the sample 1(emulsion recipe-1) showed the best softness. The results of samples 5, 4, 6, 2, and 3 had moderate softness. However, the sample 7 had the worst softness. And also, the amino-functional finishing chemicals are applied to dyed cotton knitted fabrics were compared, and it was seen that the sample 8 showed the best handle. The softness of samples 12, 14, 13,10, and 11 were moderate. Additionally, the sample 9 had the worst softness. From the results obtained, it has been determined that amino-functional silicone finishing

chemicals exhibited softening features due to their excellent film forming ability. Furthermore, they were easily emulsified, stable on dilution, compatible with other finishing agents and non-yellowing. The best handle softness was related to the affinity of amino group to fiber and also its linkage to the silicones. Similarly, the structure of the emulsifier used and compatibility of used emulsifier with amino-functional or organo-modified silicone emulsion. The result of softness ratings treated with organo-modified and amino-functional silicone emulsions were given in Table 3.

Table 3. The fabric softness ratings treated with organo-modified and amino-functional silicone emulsions

Fabrics		Softness rating	Fabrics		Softness rating
Organo-modified silicone emulsion recipes	untreated knit fabric	1.0	Amino-functional silicone emulsion recipes	untreated knit fabric	1.0
	R1 treated knit fabric	4.0		R8 treated knit fabric	5.0
	R5 treated knit fabric	between 3.0 and 4.0		R12 treated knit fabric	between 3.0 and 4.0
	R4 treated knit fabric	between 3.0 and 4.0		R14 treated knit fabric	between 3.0 and 4.0
	R6 treated knit fabric	between 3.0 and 4.0		R13 treated knit fabric	between 3.0 and 4.0
	R2 treated knit fabric	between 3.0 and 4.0		R10 treated knit fabric	between 3.0 and 4.0
	R3 treated knit fabric	between 3.0 and 4.0		R11 treated knit fabric	between 3.0 and 4.0
	R7 treated knit fabric	2.0		R9 treated knit fabric	2.0

The functional silicone finishing chemical improved performance properties (such as good softness, smoothness, whiteness and hydrophobicity) of the fabrics [32]. Amino groups were formed hydrogen bonds. These groups were strongly interacted with cellulose. The formation of hydrogen bonds between amino groups and cellulose indicated in Figure 1.

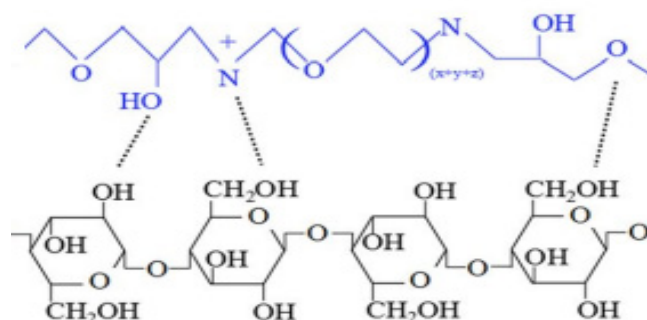


Figure 1. The formation of hydrogen bonds between amino groups and cellulose

The amino-functional silicones had a soft handle on the fiber surface. The amino-functional silicones could form a hydrophobic film on cotton knitted fabrics. Therefore, silicone (Si) also formed covalent ether bonds between cellulose and amino silicone molecules. In amino-functional silicones, the number of functional groups, viscosity and chain length are important.

In amino-functional silicone finishing chemicals, the primary functional (non-ionized NH_2) group was contributed to the electrostatic interaction with the cotton fiber, and also the $-\text{NH}_3^+$ and $-\text{NH}_2^+$ groups in the ionized state. As the amount of ionized amino groups (at pH 5.5) was increased, the electrostatic interaction of the cotton fiber with amino-functional finishing chemical was reduced. As the interaction energy was decreased (at pH 5.5), the more secondary amine groups were ionized. Thus, the handle and softness properties were improved.

4.2. Particle Sizes of Organo-Modified and Amino-Functional Silicone Emulsions

The emulsion stability characteristics, molecular conformation, particle size, pH and temperature were played significant roles in desired surface properties.

The particle distribution of emulsions homogeneity value was important. The positively charged emulsions adsorbed on the surface of negatively charged cotton fabrics. In this study, particle size graphs of silicone emulsions with the best softness and worst softness properties in organo-modified and amino-functional finishing chemicals were given in Figure 2a, 2b, 3a, 3b and Table 4.

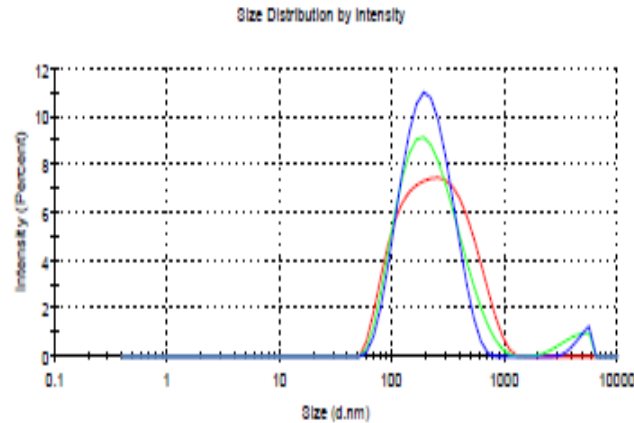


Figure 2a. The particle size of E1 organo-modified finishing chemical (the best softness property) (recipe 1). The particle size of E1 organo-modified was 286.3 nm (100 %) and the solution was cloudy (Figure 2a).

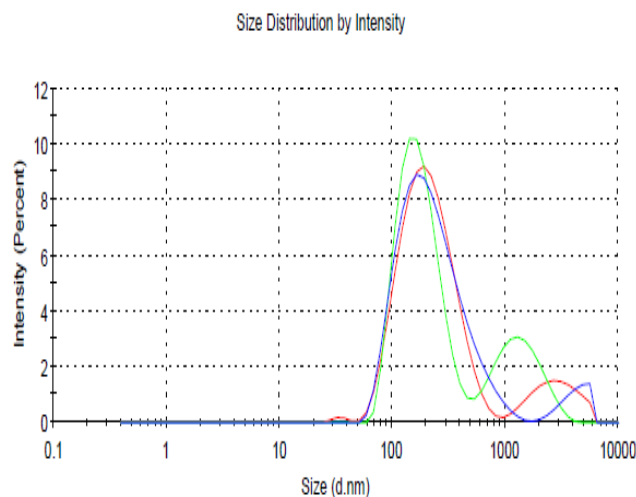


Figure 2b. The particle size of E7 organo-modified finishing chemical (worst softness property) (recipe 7). The particle size of E7 organo-modified was 227.9 nm (86.6 %) and solution was cloudy (Figure 2b).

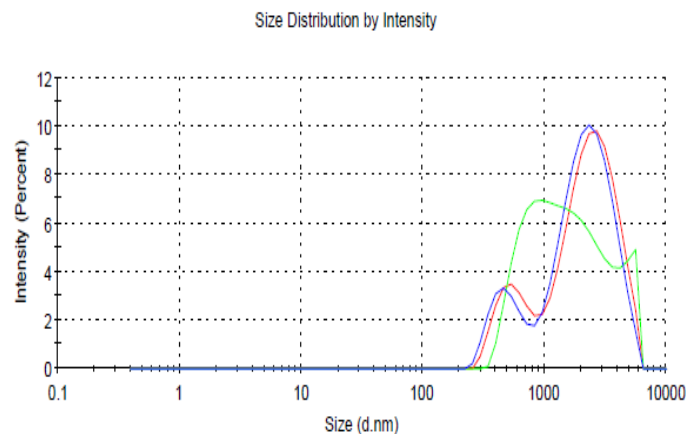


Figure 3a. The particle size of E8 amino-functional finishing chemical (the best softness property) (recipe 8). The particle size of E8 amino-functional was 2601 nm (81%) and solution was cloudy (Figure 3a).

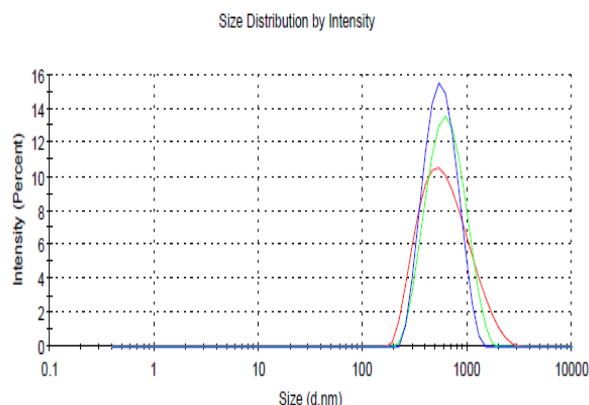


Figure 3b. The particle size of E9 amino-functional finishing chemical (worst softness property) (recipe 9). The particle size of E9 amino-functional was 684.2 nm (100 %), more than 1000nm, and solution was cloudy (Figure 3b).

Table 4. Particle sizes of organo-modified and amino-functional silicone emulsions

		Organo-modified silicone emulsion recipes						
		R1	R5	R4	R6	R2	R3	R7
Particle sizes		286.3 nm	265.5 nm	253.6 nm	251 nm	250.7 nm	239.4 nm	227.9 nm
		Amino-functional silicone emulsion recipes						
		R9	R12	R14	R13	R10	R11	R8
Particle sizes		684.2 nm	783.8 nm	1250 nm	1338 nm	1606 nm	2171 nm	2601 nm

The smaller the particle size, the more stable and the clearer emulsion appearance tends to be. The higher particle size, the more milky feature of the emulsion. Macro emulsions have narrow particle size distributions. The polydispersity values of the organo-modified finishing chemical emulsions were obtained as 0.263 and 0.344, respectively. However, in the emulsion of amino-functional, the polydispersity values were measured as 0.193 and 0.404, respectively. This means that the organo-modified and amino-functional finishing chemical emulsion prepared had a narrow distribution.

4.3. The Effect of HLB System on Emulsifying Property of Organo-Modified and Amino-Functional Silicone Emulsions

The concentration ratios of oil phase components and polar additives played significant roles in stability of the emulsion [33].

In an O/W emulsion, monomer is dispersed and stabilized by the surfactant into large monomer droplets (oil phase) and monomer-swollen micelles in water phase. Emulsifiers with HLB >8 formed oil-in-water emulsions. HLB values of organo-modified and amino-functional silicone emulsions were given in Table 5.

Table 5. HLB values of organo-modified and amino-functional silicone emulsions

		Organo-modified silicone emulsion recipes						
		R1	R5	R4	R6	R2	R3	R7
HLB values		11.25	11.25	11.25	12.95	12.95	12.95	12.95
		Amino-functional silicone emulsion recipes						
		R8	R12	R14	R13	R10	R11	R9
HLB values		11.25	12.95	12.95	11.25	11.25	12.95	12.95

Factors affecting the viscosity of emulsions were HLB value, the emulsifier type and emulsifier ratio.

4.4. Color Values and Color Differences of Organo-modified and Amino-functional Silicone Emulsions

The extent of color change dependent on the structure of the amino side-chain, on curing temperature and time.

The values of L^* were positive, all the fabric samples have become lighter. Furthermore, the fabric samples got more greenish after applied to fabric, the a^* values were negative.

The negative b^* values showed that the samples became increasingly blueish because of organo-modified and amino-functional silicone emulsions. The K/S values of silicone emulsion-containing fabrics were greater than untreated fabric. Color changes were evaluated according to the untreated fabric sample. The color difference tolerance was 1.0 in this study. As a result, all samples received a failing grade because ΔE was greater than 1 (Table 7). As seen in Table 7, higher yellowness was obtained in fabric samples applied with medium particle size of organo-modified silicone emulsions such as E4 and E5. As indicated in Table 7, the smaller particle size of finishing chemicals were obtained less color difference.

Macro silicone emulsions had the least color strength on cotton knitted fabric due to remained on the fabric surface. Macro silicone was increased the color fastness by creating a protective layer on the fabric surface.

Tested the whiteness index (Berger) of the treated fabric results indicated in the Table 6. From this table, the whiteness indexes of fabric samples treated with organo-modified and amino-functional silicone finishing chemicals were decreased at 150 °C.

Color difference was specified as a change in color of treated fabric samples with finishing silicone emulsions. Color-difference was evaluated with the CIELab color space that the reflectance values (%) in the visible wavelengths (400-700 nm). The reflectance difference values of treated and untreated fabric samples at wavelengths of 400-700 nm, as presented in Table 8. The results indicated that the reflectance difference values (%) of the treated fabrics with finishing silicone chemicals was related to the particle size, chemical type and distribution of the finishing chemical applied. As seen in Table 8, the samples treated with organo-modified and amino-functional finishing silicone chemicals exhibited a decrease in the reflectance difference values (%). The particle sizes of finishing chemical emulsions were smaller, the smaller reflectance difference values were obtained.

Table 6. Measured CIELab values of 100% cotton knitted fabrics (60g/L)

Sample	Color values						Whiteness index (Berger) of treated fabric samples at 150°C drying temperature
	L^*	a^*	b^*	C^*	h°	K/S	
0	27.30	-1.2	-1.08	1.62	222.86	9.75	6.42 (raw)
E1	25.50	-0.89	-0.82	1.21	222.53	11.49	5.37
E2	25.74	-0.88	-0.87	1.24	224.89	11.71	5.52
E3	25.47	-0.95	-0.88	1.30	222.91	11.78	5.34
E4	26.01	-0.89	-0.76	1.17	220.26	11.55	5.53
E5	25.07	-0.92	-0.73	1.18	218.62	11.55	5.23
E6	25.28	-1.03	-1.04	1.46	225.28	11.65	5.49
E7	25.59	-0.85	-0.75	1.13	221.32	11.87	5.34
E8	25.04	-0.97	-1.08	1.45	228.23	11.90	5.31
E9	25.47	-1.02	-0.95	1.39	222.90	12.46	5.46
E10	25.19	-0.95	-1.02	1.39	227.08	12.11	5.42
E11	25.26	-1.11	-1.00	1.49	222.00	12.32	5.52
E12	25.18	-0.98	-0.98	1.39	224.96	11.94	5.57
E13	25.55	-0.93	-1.06	1.41	228.82	12.04	5.57
E14	24.99	-1.01	-0.98	1.41	224.39	12.00	5.40

Table 7. The color difference between reference (raw material) and organo-modified & amino-functional treated fabric samples (60g/L)

Sample	Color differences						Assessment
	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔC^*	Δh°	ΔE	
E1	-1.80	0.31	0.26	-0.41	-0.33	2.35	Fail (darker, reddish, yellow, duller)
E2	-1.56	0.32	0.21	-0.38	2.03	2.11	Fail (darker, reddish, yellow, duller)
E3	-1.83	0.25	0.20	-0.32	0.05	2.92	Fail (darker, reddish, yellow, duller)
E4	-1.29	0.31	0.32	-0.45	-2.6	2.19	Fail (darker, reddish, yellow, duller)
E5	-2.23	0.28	0.35	-0.44	-4.24	2.85	Fail (darker, reddish, yellow, duller)
E6	-2.02	0.17	0.04	-0.16	3.42	2.50	Fail (darker, reddish, yellow, duller)
E7	-1.71	0.35	0.33	-0.49	-0.54	2.71	Fail (darker, reddish, yellow, duller)
E8	-2.26	0.23	0	-0.17	6.37	3.04	Fail (darker, reddish, yellow, duller)
E9	-1.83	0.18	0.13	-0.23	1.04	3.49	Fail (darker, reddish, yellow, duller)
E10	-2.11	0.25	0.06	-0.23	5.22	2.75	Fail (darker, reddish, yellow, duller)
E11	-2.04	0.09	0.08	-0.13	0.14	2.68	Fail (darker, reddish, yellow, duller)
E12	-2.12	0.22	0.10	-0.23	3.10	2.79	Fail (darker, reddish, yellow, duller)
E13	-1.75	0.27	0.02	-0.21	6.96	2.60	Fail (darker, reddish, yellow, duller)
E14	-2.31	0.19	0.10	-0.21	2.53	2.78	Fail (darker, reddish, yellow, duller)

ΔL^* = Difference in lightness or darkness value, Δa^* = Difference in red/green axis, Δb^* =Differences in yellow / blue axis, ΔC^* = Difference in chroma, Δh° = Difference in hue, ΔE = Color difference value

Table 8. The reflectance difference(ΔR) between untreated and treated fabric samples

	Wavelength (nm)															
ΔR	400	420	440	460	480	500	520	540	560	580	600	620	640	660	680	700
E1	-1	-0.91	-0.88	-0.89	-0.87	-0.87	-0.86	-0.81	-0.74	-0.7	-0.66	-0.64	-0.65	-0.84	-1.02	-1.09
E2	-1.11	-0.99	-0.95	-0.98	-0.96	-0.93	-0.9	-0.83	-0.77	-0.75	-0.69	-0.68	-0.72	-0.78	-0.66	-0.3
E3	-1.12	-0.99	-0.99	-0.99	-0.97	-0.97	-0.96	-0.91	-0.84	-0.81	-0.76	-0.74	-0.68	-0.78	-1.25	-1.2
E4	-1.02	-1.02	-0.98	-0.99	-0.98	-0.98	-0.96	-0.91	-0.84	-0.8	-0.74	-0.67	-0.68	-0.9	-1.14	-1.32
E5	-1.01	-0.99	-0.92	-0.98	-0.96	-0.93	-0.9	-0.83	-0.84	-0.77	-0.69	-0.67	-0.68	-0.78	-0.66	-0.3
E6	-1.06	-0.97	-0.92	-0.91	-0.9	-0.89	-0.9	-0.85	-0.8	-0.77	-0.73	-0.7	-0.72	-0.85	-1.14	-1.08
E7	-1.18	-1.11	-1.05	-1.06	-1.06	-1.05	-1.06	-0.98	-0.9	-0.86	-0.8	-0.77	-0.78	-1.02	-1.43	-1.69
E8	-1.03	-1.03	-0.98	-0.99	-0.99	-0.99	-0.99	-0.93	-0.88	-0.85	-0.8	-0.78	-0.78	-0.95	-1.23	-1.33
E9	-1.23	-1.2	-1.15	-1.17	-1.17	-1.17	-1.17	-1.11	-1.05	-1.03	-0.98	-0.9	-0.87	-1.07	-1.42	-1.45
E10	-1.11	-1.09	-1.06	-1.09	-1.08	-1.07	-1.06	-1.01	-0.94	-0.91	-0.87	-0.84	-0.87	-1.07	-1.42	-1.45
E11	-1.17	-1.13	-1.09	-1.11	-1.11	-1.12	-1.12	-1.07	-1	-0.97	-0.92	-0.88	-0.93	-1.17	-1.62	-1.75
E12	-1.05	-1.05	-1	-1.01	-1	-1.01	-1	-0.95	-0.9	-0.87	-0.83	-0.79	-0.84	-1.03	-1.31	-1.34
E13	-1.08	-1.07	-1.03	-1.04	-1.02	-1.01	-1	-0.95	-0.9	-0.88	-0.85	-0.82	-0.85	-1.07	-1.52	-1.64
E14	-1.08	-1.04	-1	-1.02	-1.02	-1.02	-0.96	-0.89	-0.89	-0.86	-0.8	-0.81	-0.79	-0.97	-1.29	-1.31

* $\Delta R = R_{\text{numune}} - R_{\text{standart}}$ (Reflectance difference value)

5. CONCLUSION

In this study, the effects of emulsion ratio, organo-modified and amino-functional silicone emulsion type, particle size of silicone emulsion on the fabric handle, whiteness index, color values and color difference of cotton knitted fabrics were examined. The main results are summarized as follows:

Produced softener emulsions were applied to the 100% cotton knitted fabrics via pad cure technique.

Application of silicone emulsion affected the values of dyed fabrics.

Macro silicone emulsion provided high softness, minimum shade change and increased color yield. The produced silicone emulsions were characterized via particle size. Macro-silicone softeners increased surface roughness and uniformity.

Emulsion stability and particle size distribution created the desired surface properties on treated with amino-functional silicone emulsion cotton knitted fabric samples. And also, silicone (Si) also formed covalent ether bonds between cellulose and amino silicone molecules that provided a good soft handle. Experimental results showed that softening, as the amount of ionized amino groups in amino-functional finishing chemicals was increased, the softening ability of the fabric was increased. This corresponded to a pH of approximately 6.0 for amino-functional finishing chemicals. As the pH value was decreased (at pH 5.5), the more secondary amine groups were ionized. Thus, the handle and softness properties were improved. With optimum orientation of silicones on the fiber surface, a good softness and smoothness was achieved. The amino groups were become cationic (NH_3^+) at acidic conditions and the strong interaction with the fabric was achieved.

Less yellowing was obtained in fabric samples applied with amino-functional finishing chemicals owing to the oxidation of amino groups in the presence of air, heat or light energy. In amino-functional silicones, azo yellow and azoxy yellow compounds were obtained as a result of oxidation of amino group.

The smaller the particle size, the more stable the emulsion tends to be. Fabrics treated with the organo-modified chemicals that were smaller in particle size gave higher reflectance values (%). Consequently, the smaller particle size of finishing chemicals had a high surface area and gave a smoother reflecting surface. In addition, the less color difference was obtained in the fabric samples applied with the small particle size of finishing silicone chemicals.

6. ACKNOWLEDGMENTS

The author thanks to Denge Chemistry (Tekirdag/ Turkey) for this support in the supply of additives (alcohol ethoxylates (IT3, IT6, IT 12)).

7. REFERENCES

1. Hussain, T., Nazir, A. & Masood, R. (2015). *3rd International conference on value addition & innovation in textiles*. Covitex, National Textile University, Faisalabad, Pakistan, 15-26.
2. Özkan, E.T. & Meric, B. (2015). Thermo physiological comfort properties of different knitted fabrics used in cycling clothes. *Textile Research Journal*, 85(1), 62-70.
3. Bedek, G., Salaün, F., Martinkovska, Z., Devaux, E. & Dupont, D. (2011). Evaluation of thermal and moisture management properties on knitted fabrics and comparison with a physiological model in warm conditions. *Applied Ergonomics*, 42(6), 792-800.
4. Sampath, M.B., Aruputharaj, A., Senthilkumar, M. & Nalankilli, G. (2012). Analysis of thermal comfort characteristics of moisture management finished knitted fabrics made from different yarns. *Journal of Industrial Textiles*, 42(1), 19-33.
5. Kothari, V.K. (2006). Thermo-physiological comfort characteristics of blended yarn woven fabrics. *Indian Journal of Fiber & Textile Research*, 31, 177-186.
6. Artikboeva, R., Yang, M., Wu, Y., Jie, C. & Heng, Q. (2020). Preparation and Application of the Hydrophilic Amino-Silicone Softener by Emulsion Polymerization. *Adv. Chem. Eng. Sci*, 10, 1-23.
7. Hassabo, A. & Mohamed, A. (2019). Review of silicon-based materials for cellulosic fabrics with functional applications. *Journal of Textiles, Coloration and Polymer Science*, 16, 139-157.
8. Zuber, M., Zia K.M., Tabassum S., Jamil T., Barkaat-ul-Hasin S. & Khosa M.K. (2011). Preparation of rich handles soft cellulosic fabric using amino silicone based softener, Part II: colorfastness properties. *Int. J. Biolog.Macromol.*, 49, 1-6.
9. Purohit, P.S. & Somasundaran, P. (2014). Modification of surface properties of cellulosic substrates by quaternized silicone emulsions. *J. Colloid Interf. Sci.*, 426, 235-240.
10. Haberer, P. & Bereck A. (2002). Part 2: Silicone softeners. *Rev. Prog. Coloration Relat. Top.*, 32, 125-137.
11. Bereck, A., Weber B., Riegel, D., Bindl, J., Haberer, P., Huhn, K.G., Lautenschlager, H.J. & Preiner, G. (1997). Amino ethyl aminopropyl-silicone. *Textilveredlung*, 32, 135-137.
12. Gajdzicki, B., Srodzizmi (2017). Softeners and their influence on the use properties of textile products. *In Proceedings of the XXXIII Seminarium Polskich Kolorystów*, Bydgoszcz, Poland, 20-22 September, 195-207.
13. Islam, M.S., Lahiri, S.K., Nahar, J. & Alomgir, M. (2015). Synthesis and application of amino-modified silicone oil on cotton fabric. *Int. J. Sci. Eng. Res.*, 6, 1195-1203.
14. Mohamed, A.L. & Hasabo, A.G. (2019). Review of silicon-based materials for cellulosic fabrics with functional applications. *Journal Textiles Coloration and Polymer Science*, 16(2), 139-157.
15. Mai, C. & Militz, H. (2004). Modification of wood with silicon compounds. inorganic silicon compounds and sol-gel systems: A review. *Wood Science and Technology*, 37(5), 339-348.
16. DeMatteo, R., Warden, D., Marshall, J. & Goodyear N. (2014). Fabric softeners impact cleaning, but not disinfection, by a saturated steam vapor system. *Am. J. Infect. Control*, 42, 462-463.
17. Vazquez, F. (2011). Silicone softeners for stain repellent and stain release fabric finishing. Dow Corning Corp. Technical Doc.
18. Paul, R. (Ed.)(2015). Functional finishes for textiles: improving comfort, performance and protection. *Woodhead Publishing Limited (in association with The Textile Institute)*, Elsevier, Cambridge, England.
19. Jahagirdar, C.J. & Tiwari, L.B. (2004a). Study of plasma polymerization of dichloromethane on cotton and polyester fabrics. *J. Appl. Polym. Sci.* 94(5), 2014-2021.
20. Zia, K.M., Tabassum, S., Hasin, S.B., Zuber, M., Jamil, T. & Jamal, M.A. (2011). Preparation of rich handle soft cellulosic fabric using amino silicone based softener: Part-I: surface smoothness and softness properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 48(3), 482-487.
21. Lautenschlager, H.J., Bindl, J. & Huhn, K.G. (1995). Structure activity relationships of aminofunctional siloxanes as components in softening finishes. *Text Chem Color*, 27(3), 27-29.
22. Islam, M.S., Lahiri, S.K., Nahar, J. & Alomgir, M. (2015). Synthesis and application of amino-modified silicone oil on cotton fabric. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 6(5), 1195-1203.
23. Sabia, A.J. & Pagliughi, A.M. (1987). The use of kawabata instrumentation to evaluate silicon fabric softeners. *Text Chem Color*, 19(25).

24. Joyner M.M. (1986). Amino-functional polysiloxanes: a new class of softeners, *Text Chem Color*, 18, 34.
25. Skinner, M.W., Qian, C., Grigoras, S., Halloran, D.J. & Zimmerman, B.L. (1999). Fundamental aspects of aminoalkyl siloxane softeners by molecular modeling and experimental methods. *Textile Research Journal*, 69(12), 935-943.
26. Islam, M.M., Islam, A. & Jiang, H. (2015). Silicone softener synthesis and application on knit and woven white cotton fabrics. *American Journal of Polymer Science & Engineering*, 3(1), 10.
27. Sancar Besen, B. & Balcı, O. (2017). Investigation of the effects of silicone emulsions having different particle sizes on knitted fabrics depending on the type of yarn. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 29(3), 394-416.
28. Özdil N., Özgüney A.T., Mengüç G.S. & Dalbaşı E.S. (2019). A comparative study on handle properties of bamboo and cotton fabrics. *Industria Textila*, 70(3), 278-284.
29. Zuber, M., Zia, K.M., Tabassum, S., Jamil, T., Hasin, S.B. & Khosa, M.K. (2011). Preparation of rich handless soft cellulosic fabric using amino silicone based softener, Part II: colorfastness properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 49(1), 1-6.
30. AATCC TM 110, (2000). Standard test method for whiteness of textiles, 165-166.
31. Yıldız, E.Z. & Özdil, N. (2014). Subjective and objective evaluation of the handle properties of shirts fabric fused with different woven interlinings. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 24(1), 47-55.
32. Xu, Y., Hong, Y., Yuan S. & Chen Z. (2009). Film morphology and orientation of amino silicone adsorbed onto cellulose substrate. *Appl Surf Sci*, 255(20), 8435-8442.
33. Smejkal, G., Gross, V. & Lazarev, A. (2024). Theoretical and experimental determinations of the hydrophilic-lipophilic balance (HLB) of representative oils and lecithins. *Colloids Interfaces*, 8(2), 21.

XGBoost (Aşırı Gradyan Artırılmış Karar Ağaçları) ile Hidroelektrik Enerji Tahmini

Bektaş Aykut ATALAY^{1,a}, Kasım ZOR^{1,b}

¹Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Adana

^aORCID: 0000-0003-4542-6104; ^bORCID: 0000-0001-6443-114X

Makale Bilgileri

Geliş : 01.11.2024

Kabul : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1666062

Sorumlu Yazar

Bektaş Aykut ATALAY

bektasaykut@gmail.com

Anahtar Kelimeler

HES

Hidroelektrik

Tahmin

XGBoost

Atıf şekli: ATALAY, B., A., ZOR, K., (2025). XGBoost (Aşırı Gradyan Artırılmış Karar Ağaçları) ile Hidroelektrik Enerji Tahmini. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(1), 205-218.

ÖZ

Hidroelektrik enerji, Türkiye'nin hızlı ekonomik ve nüfus artışıyla yükselen enerji talebinin karşılanmasında büyük önem taşır. Mevsimsel bağımlılığı nedeniyle hidroelektrik enerji tahmin algoritmaları için uygundur. Bu çalışma, Türkiye'de 100 MW'ın üzerinde güç üreten EÜAŞ Aslantaş HES'te enerji üretimini tahmin etmeyi amaçlamaktadır. Tahmin modeli, XGBoost (Aşırı Gradyan Artırılmış karar ağaçları) ile tarih-saat kayıtları, geçmiş enerji üretim verileri ve sıcaklık gibi çeşitli girdi kullanılarak oluşturulmuştur. Üretim verileri, EPIAŞ Şeffaflık Platformu'ndan alınmış ve Python ile işlenmiştir. XGBoost modeli, farklı ağaç sayıları ve öğrenme oranı (η) deneyerek optimize edilmiştir. Modelin etkinliği, belirleme katsayısı (R^2), Ortalama Mutlak Ölçekli Hata (MASE), Kök Ortalama Karesel Hata (RMSE), Ortalama Mutlak Hata (MAE) ve Ağırlıklı Mutlak Yüzdese Hata (WAPE) gibi çeşitli hata ölçümleri ile titizlikle değerlendirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan yöntemler ve elde edilen sonuçlar, hidroelektrik enerji tahmininde makine öğrenimi algoritmalarının faydalı olabileceğini ve enerji yönetimi stratejilerinin optimize edilmesine yönelik önemli bilgiler sunabileceğini göstermektedir.

Hydroelectric Power Forecasting via XGBoost (Extreme Gradient Boosted Decision Trees)

Article Info

Received : 01.11.2024

Accepted : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1666062

Corresponding Author

Bektaş Aykut ATALAY

bektasaykut@gmail.com

Keywords

HPP

Hydroelectricity

Forecasting

XGBoost

How to cite: ATALAY, B., A., ZOR, K., (2025). Hydroelectric Power Forecasting via XGBoost (Extreme Gradient Boosted Decision Trees). Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(1), 205-218.

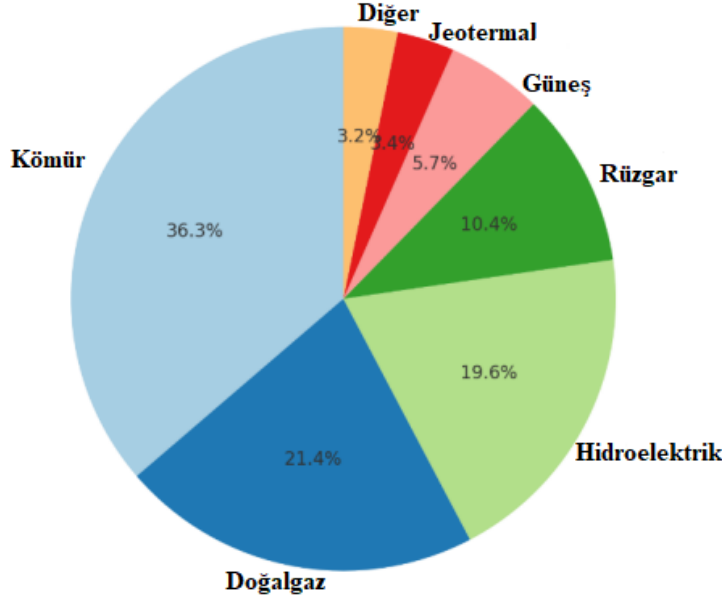
ABSTRACT

Hydropower energy is crucial for meeting Turkey's growing energy demand, driven by rapid economic and population growth. Its seasonal variability makes it suitable for forecasting algorithms. This study aims to predict energy production at the EÜAŞ Aslantaş Hydroelectric Power Plant, with a capacity exceeding 100 MW. A forecasting model was created using XGBoost (Extreme Gradient Boosted Decision Trees) incorporating inputs such as timestamp, historical energy production data, and temperature. Energy data source is the EPIAŞ Transparency Platform and the data was processed with Python. The model was optimized by varying the number of trees and learning rates (η). Its effectiveness was rigorously assessed using statistical metrics, including the coefficient of determination (R^2), Mean Absolute Scaled Error (MASE), Root Mean Squared Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), Weighted Absolute Percentage Error (WAPE). The results indicate that machine learning algorithms can significantly enhance hydropower energy forecasting and optimize energy management strategies.

1. GİRİŞ

Hidroelektrik enerji, önemli bir yenilenebilir enerji kaynağı olup küresel enerji üretiminde kritik bir rol oynamaktadır. Enerji üretiminin yanı sıra, taşkın kontrolü, sulama ve su temini gibi faydaları da bulunmaktadır. Hidroelektrik enerji; tarım, ekonomi, doğal afetlere karşı koruma ve temiz su temini açısından büyük bir öneme sahiptir.

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'na göre, Türkiye'nin elektriğinin %36,3'ü kömürden, %21,4'ü doğalgazdan, %19,6'sı hidroelektrik enerjiden, %10,4'ü rüzgârdan, %5,7'si güneşten, %3,4'ü jeotermal enerjiden ve %3,2'si diğer kaynaklardan üretilmektedir. Şekil 1'de görüldüğü üzere, 2023 yılı itibarıyla Türkiye'nin elektrik enerjisi üretiminde hidroelektrik enerjinin payı beşte birdir [1].



Şekil 1. Türkiye'nin 2023 yılı elektrik üretim kaynakları

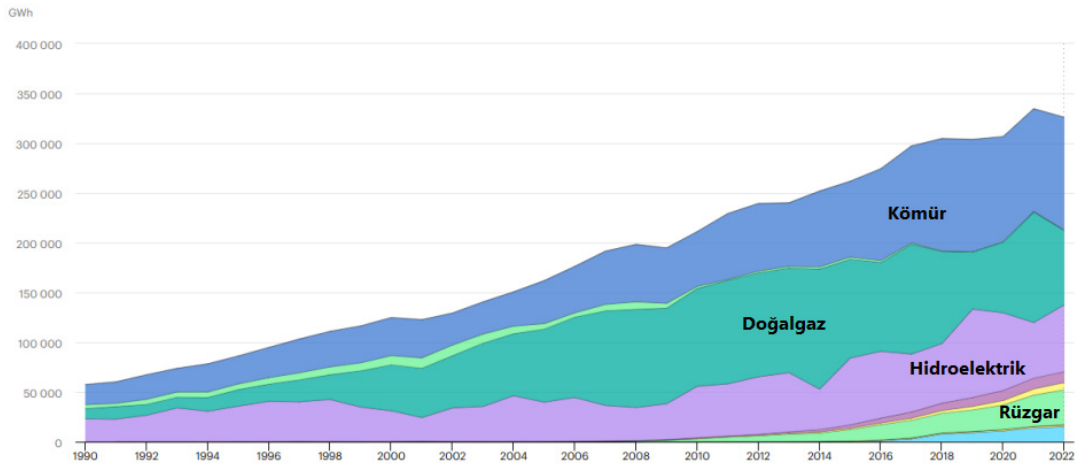
Hidroelektrik enerjinin elektrik üretimindeki payının yanı sıra elektrik üretim maliyeti ve yenilenebilir olması Türkiye için önemli faktörlerdir. Hidroelektrik enerji üretiminde suyun potansiyel ve kinetik enerjisi kullanıldığından elektrik enerjisi üretimi için sadece su ve suyun kontrolü yeterlidir; başka bir yakıtı ihtiyaç duyulmadığından çevre kirliliği oluşmaz.

Hidroelektrik enerji üretimi, birçok faktöre bağlıdır ve bu faktörler üretimin maksimize edilmesi ve sürdürülebilmesi için büyük önem taşır. Dolayısıyla hidroelektrik enerji üretiminin planlanması gereklidir. Bu planlama, elektrik piyasasının arz ve talep dengesi ile mevsimsel koşullara göre yapılmalıdır. Bu çalışmanın da temel motivasyonu hidroelektrik enerji üretiminin tahmin edilmesidir.

Hidroelektrik enerji, ülkenin en yaygın kullanılan yenilenebilir enerji kaynağı olmasına rağmen yağmur, kar yağışı ve kuraklık gibi etkenlere bağlıdır. Dolayısıyla, hidroelektrik enerji üretimi tahmini, enerji planlayıcılarının ve operatörlerinin bu etkenlerdeki değişimleri öngörmesine olanak tanıyarak ülke için güvenilir ve istikrarlı bir elektrik arzını destekler [2].

Hidroelektrik enerji üretiminin tahmini, şebeke operasyonlarının optimize edilmesi, istikrarlı bir enerji arzının sağlanması ve işletmecilik maliyetlerinin azaltılması açısından kritik bir etkidir [3].

Aslantaş HES, Ceyhan Nehri üzerinde kurulmuş olup, Doğu Akdeniz Bölgesi'nin ana su yollarından biridir. 138 MW kurulu güce sahip olan Aslantaş HES, yılda yaklaşık 569 GWh elektrik üretmektedir. Barajın oluşturduğu geniş rezervuar, ortalama su seviyesinde 1.150 milyon m³ kapasiteye sahiptir ve sulamada önemli bir rol oynar. Yaklaşık 149.849 hektar araziye sulayan baraj, Ceyhan Nehri boyunca taşkın yönetimi için de hayati öneme sahiptir. Aslantaş barajı, su akışının düzenlenmesine ve olası taşkın olaylarının azaltılmasına yardımcı olmaktadır.



Şekil 2. Kaynaklara göre enerji üretimi, Türkiye, 1990-2022 [4]



Şekil 3. Aslantaş Barajı ve HES konumu

Aslantaş Barajı ve Hidroelektrik Santrali'nin yapımına 1976 yılında başlanmış ve 1984 yılında tamamlanmıştır. Toprak dolgu tipinde inşa edilen barajın gövde hacmi 8.493.000 m³, kret uzunluğu 585 m ve yüksekliği 95 m'dir. Barajın maksimum su seviyesi 155 m, depolama kapasitesi 1.799 hm³ ve göl alanı 63 km²'dir. Santralde üretilen elektrik enerjisi, 154 kV'a kadar yükseltilerek ulusal elektrik şebekesine bağlanmaktadır [5].

Hidroelektrik santralleri, sel kontrolü ve su kaynaklarının yönetiminde kritik bir rol oynar. Doğru enerji üretimi tahmini, su akışının düzgün yönetilmesine yardımcı olarak sel risklerini azaltır.

Tahminler, sulama ve içme suyu temini için yeterli su sağlanmasına yardımcı olur, böylece sürdürülebilir su yönetimini destekler [6,7].

Daha iyi tahmin modelleri, hidroelektrik projeler için finansal planlama ve yatırım stratejilerini geliştirebilir, enerji üretimini doğru tahmin ederek ve bakım programlarını optimize ederek ekonomik verimliliği ve güvenilirliği artırır. Bu modeller, su kaynaklarının kullanımını optimize ederek sulama ve su teminini daha ekonomik ve etkili hale getirir [8,9].

Hidroelektrik üretiminin optimizasyonu için hidroelektrik tahminleri çok önemlidir ve rezervuar operasyonlarını ve enerji üretimini etkin bir şekilde yönetmek için kesin tahminler gerektirir. XGBoost gibi ileri makine öğrenimi tekniklerinin kullanılması, hidroelektrik tahminlerinin doğruluğunu artırabilir. Büyük veri kümelerini ele alma konusundaki ölçeklenebilirliği ve verimliliği ile bilinen XGBoost algoritması, çeşitli tahmin uygulamalarında umut verici sonuçlar göstermiştir [10].

Araştırmalar hidroelektrik operasyonlarında tahmin kalitesinin önemini vurgulamakta ve akarsu akışının kesin tahminlerinin hidroelektrik yönetimindeki karar alma süreçlerini doğrudan etkilediğini vurgulamaktadır [11].

Hidroelektrik tahminleri alanında XGBoost gibi makine öğrenimi yöntemlerinin kullanımı, taşkın tahminleri için giderek daha uygun hale gelmektedir. Bu, XGBoost'un hidroelektrik tahmin modellerinde verimli bir şekilde kullanıma potansiyelini göstermektedir [12-15].

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, son yıllarda çeşitli enerji tahmin problemlerinde kullanılan XGBoost algoritmasının etkinliğini ve uygulamalarını incelemektedir. Çalışmalar, rüzgar ve güneş enerjisi tahmininden hidroelektrik güç tahminine kadar geniş bir yelpazede XGBoost'un diğer makine öğrenme yöntemlerine kıyasla üstün performans sergilediğini göstermektedir. Ayrıca, literatür çalışmaları yıllara göre ayrı ayrı incelenmiş ve farklı uygulama alanları değerlendirilmiştir.

2.1. 2018 Yılı Literatürü

Zhang ve arkadaşları [16], özellikle açık deniz sahaları için rüzgar türbini güvenilirliğini ele alarak, arıza tespiti için random forests (RF) ve XGBoost yöntemlerini kullanmaktadır. RF, özellik önemini sıralarken, XGBoost belirli arızalar için sınıflandırıcıyı eğitir. Farklı rüzgar türbini modelleri ile yapılan simülasyonlar, bu yaklaşımın çok boyutlu veri işleme konusunda sağlam ve üstün performansını doğrulamaktadır ve destek vektör makinelerinden (SVM) daha iyi sonuçlar vermektedir.

Liu ve arkadaşları [17], geleneksel tahmin yöntemlerinde yüksek hesaplama maliyeti ve aşırı uyum sorunlarını ele almak için K-means kümeleme ve XGBoost'u birleştiren bir yöntem önermektedir. Çalışmada özellikler çıkarılır ve eksik değerler doldurulur. Yük sınıflandırılır ve XGBoost regresyon modelleri günlük yükü tahmin eder, bu da doğruluğun arttığını göstermektedir. Zheng ve Wu [18], kısa vadeli rüzgar gücü tahmini için hava durumu benzerlik analizi ve özellik mühendisliği içeren bir XGBoost modeli önermektedir. K-means kümeleme, tarihsel verileri kategorize eder ve önemsiz özellikler elenir. Model, tahmin doğruluğunda BPNN, CART, RF, SVR ve tek bir XGBoost modelinden daha iyi performans göstermektedir.

2.2. 2019 Yılı Literatürü

Abbasi ve arkadaşları [19], günlük verileri haftalık zaman serilerine dönüştürerek kısa vadeli yük tahmini için XGBoost kullanmaktadır. Özellik seçimi ve tahmin, XGBoost kullanılarak gerçekleştirilir ve bu yöntem hesaplama süresi, bellek kaynağı kullanımı ve ortalama yüzde hata metriğinde üstün performans sergiler. Suo ve arkadaşları [20], meteorolojik, nüfus ve coğrafi faktörleri dahil ederek yük tahmini için XGBoost'u tanıtmaktadır. Modelin paralellik ve aşırı uyum önleme özellikleri tahmin doğruluğunu artırır. Çok boyutlu model, yalnızca sıralı özellikleri dikkate alan modellere göre önemli bir doğruluk artışı gösterir. Li ve arkadaşları [21], güç yükü tahmin doğruluğunu artırmak için LSTM ve XGBoost'u birleştiren bir tahmin modeli önermektedir. Hata ters çevirme yöntemi, her iki modelin sonuçlarını birleştirir. Birleşik model, bireysel modellere kıyasla önemli ölçüde daha düşük tahmin hatası gösterir.

Liao ve arkadaşları [22], benzer günlere dayalı kısa vadeli yük tahmini için bir XGBoost modeli önermektedir ve meteorolojik ve günlük türlerin yük üzerindeki etkilerini analiz eder. Model, karmaşıklık ve aşırı uyumu kontrol etmek için ikinci dereceden Taylor genişlemesi ve kayıp fonksiyonunu içerir. Simülasyon sonuçları, modelin kısa vadeli yük tahmininde etkinliğini göstermektedir.

2.3. 2020 Yılı Literatürü

Guo ve arkadaşları [23], birden fazla makine öğrenimi algoritmasını entegre eden Stacking topluluk öğrenme yöntemi tabanlı bir fotovoltaik güç tahmin modeli önermektedir. Sonuçlar, Stacking modelinin XGBoost'tan daha iyi performans gösterdiğini ve 0.1007 olan kök ortalama kare hatası (RMSE) değerinin XGBoost'a göre %1.84 daha düşük olduğunu ve 90.85 puanının XGBoost'tan 1.49 daha yüksek olduğunu göstermektedir. Phan ve arkadaşları [24], kısa vadeli rüzgar gücü tahmini için XGBoost'un geleneksel yapay sinir ağı (ANN), uzun kısa süreli bellek (LSTM) ve zamansal evrişim ağı (TCN) modelleriyle performansını karşılaştırmaktadır. Çalışmadaki bulgular, XGBoost'un karşılaştırılan tüm modellerden daha iyi performans gösterdiğini göstermektedir.

2.4. 2021 Yılı Literatürü

Al Rayess ve Ülke Keskin [25], Almus Barajı'nda hidroelektrik enerji üretimini tahmin etmek için Karar Ağacı, Derin Öğrenme, Genelleştirilmiş Doğrusal Model, Gradient Boosted Trees ve Random Forest gibi çeşitli makine öğrenme tekniklerini kullanmıştır. Zhang ve arkadaşları [26], gri kurt optimizasyonunu (HGWO) XGBoost ile birleştiren hibrit bir yaklaşım kullanarak beton barajlar için yeni bir sızıntı izleme modeli önermektedir. HGWO-XGBoost modelinin, güçlü küresel optimizasyon yeteneği ve tatmin edici tahmin sonuçları gösterdiği sızıntıyı etkili bir şekilde tahmin ettiği belirtilmiştir. Ma ve arkadaşları [27], sel riski değerlendirmesi için En Küçük Kareler Destek Vektör Makinesi (LSSVM) modeli ile XGBoost modelini kullanmaktadır. Bu çalışma, XGBoost'un CPU'nun çoklu iş parçacıklarını verimli kullanması nedeniyle geliştirilmiş model eğitim hızı ve tahmin doğruluğunu vurgulamaktadır.

Osman ve arkadaşları [28], yağış, sıcaklık ve buharlaşma gibi önceden kaydedilmiş verileri kullanarak yeraltı suyu seviyelerini tahmin etmek için XGBoost tabanlı bir model önermektedir. Araştırma, Malezya'nın Selangor bölgesindeki yoğun nüfuslu kasabalarda azalan yeraltı suyu seviyelerine çözüm bulmayı hedeflemekte ve üç makine öğrenme modelinin performansını değerlendirmektedir.

Zhang ve arkadaşları [29], Jinshuitan Nehir Havzası'ndaki rezervuar akışlarını tahmin etmek için konvolüsyonel sinir ağları (CNN), XGBoost ve kısmi en küçük kareler modelini entegre eden bir yöntem sunmaktadır. Bu model, tekil modellere kıyasla kök ortalama kare hatasını (RMSE) önemli ölçüde azaltarak, akış tahminlerinde daha yüksek doğruluk sağlamıştır. Bae ve arkadaşları [30], sayaç arkasında (BTM) bulunan güneş PV jeneratörlerinin elektrik yükünde neden olduğu bozulmayı ele almak için XGBoost tabanlı bir yük tahmin algoritması önermektedir.

Wang ve arkadaşları [31], ham yük verilerini VMD ve SampEn (SVMD) kullanarak trend serileri ve dalgalanma alt serilerine ayıran ve tahmin için XGBoost'u kullanan endüstriyel müşteriler için kısa vadeli yük tahmini için hibrit bir yöntem önermektedir. Phan ve arkadaşları [32], bir saat ileriye yönelik güneş enerjisi tahminleri için Kernel Principal Component Analysis (PCA) ve XGBoost'a dayalı bir makine öğrenme modeli önermektedir. Model, tahmin doğruluğunu artırmak için sayısal hava tahmini (NWP) verilerini ve sağlam performans için karar ağaçlarının bir entegrasyonunu kullanmıştır.

Phan ve arkadaşları [33], sayısal hava tahmin (NWP) modellerini XGBoost ile birleştiren hibrit bir rüzgar gücü tahmin modeli önermektedir. Wang ve arkadaşları [34], petrol ve gaz keşfi bağlamında rezervuar sınıflandırması ve değerlendirilmesi için geliştirilmiş bir hiyerarşik XGBoost (h-XGBoost) modelleme yöntemi tanıtmaktadır. Xinjiang'daki Mahu bölgesindeki sıkışık konglomera rezervuarı üzerinde yapılan çalışma, h-XGBoost yönteminin farklı rezervuarlardan özellikler çıkarma ve hiyerarşik bir veri modeli oluşturma konusundaki etkinliğini göstermektedir.

Udo ve Muhammad [35], tarihsel SCADA verilerini kullanarak rüzgar türbinlerinin kestirimci bakımı için bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntemde, kritik rüzgar türbini bileşenlerinde anormallikleri izlemek ve tespit etmek için XGBoost ve Long Short-Term Memory (LSTM) modelleri kullanılır.

2.5. 2022 Yılı Literatürü

Chen ve arkadaşları [36], su türbini jeneratörlerinin mil kaçıklığı eğilimini tahmin etmek ve hidroelektrik birimlerindeki arızaları tespit etmek için XGBoost algoritmasını kullanmayı önermektedir. Hidroelektrik

santral içindeki sensörlerden gelen kaynak verileri ön işleme tabi tutularak regresyon ve sınıflandırma için XGBoost modeline giriş verisi olarak kullanılmıştır. Önerilen yöntem, potansiyel ekipman tehlikelerini etkili bir şekilde tanımlayarak hidroelektrik santralinin zekasını ve operasyonel optimizasyonunu artırmaktadır.

Fan ve arkadaşları [37], hava tahminlerini kullanarak rüzgar ve güneş gibi yeni enerji kaynaklarından enerji üretimini tahmin etmeye odaklanmaktadır. XGBoost ve LightGBM modellerini kullanılmıştır. Singh ve Rizwan [38], SCADA sisteminden elde edilen zaman serisi verilerini kullanarak rüzgar gücünü tahmin etmeyi amaçlamaktadır. Veri kümesi çeşitli tekniklerle incelenir ve görselleştirilir, ardından rüzgar gücünü tahmin etmek için XGBoost dahil olmak üzere makine öğrenme algoritmaları uygulanmıştır. Deneysel bulgular, XGBoost regresyon yaklaşımının yüksek tahmin doğruluğu sağladığını ve R^2 'nin yaklaşık 0.969 olduğunu, düşük MSE, RMSE, MAPE ve MAE değerleri ile göstermektedir.

Xue ve arkadaşları [39], Long Short-Term Memory (LSTM) ve XGBoost algoritmalarını entegre eden bir fotovoltaik güç tahmin modeli sunmaktadır. Her iki modelin avantajlarını birleştirerek, önerilen XGBoost-LSTM modeli daha doğru tahmin sonuçları elde etmektedir. Mohamed ve arkadaşları [40], Çoklu Doğrusal Regresyon (MLR) ve Pearson Korelasyon Katsayısı (PCC) kullanarak güneş gücü tahmini için hibrit bir makine öğrenme sistemi önermektedir. Xiong ve arkadaşları [41], kısa vadeli rüzgar gücü tahmini için Bayes hiperparametre optimizasyonu (BH-XGBoost) ile iyileştirilmiş bir XGBoost algoritması tanıtmaktadır. Bu yöntem, özellikle aşırı hava koşulları ve düşük rüzgar hızları nedeniyle meydana gelen rüzgar ramp olaylarında XGBoost, SVM, KELM ve LSTM'den daha iyi performans göstermektedir.

Wang ve arkadaşları [42], entegre ampirik mod ayrışımı, varyasyonel mod ayrışımı ve serçe arama algoritması ile optimize edilmiş XGBoost kullanarak hibrit bir tahmin modeli (ICEEMDAN-SE-VMD-SSA-XBoost-MLR) önermektedir. Model, geçmiş yük verileri ve hata düzeltme mekanizması ile doğrulanmış olup, pik yük tahmininde yüksek doğruluk sağlamaktadır.

2.6. 2023 Yılı Literatürü

Hong ve arkadaşları [43], meteorolojik koşullar nedeniyle güneş enerjisinin stokastik doğasıyla ilgili zorlukları ele almak için XGBoost algoritmasını kullanarak bir PV (fotovoltaik) güç tahmin yöntemi önermektedir. PV güç tahmin modeli oluşturulmuş ve bir vaka çalışmasıyla değerlendirilmiş olup, önerilen yöntemin etkinliğini göstermektedir. Zou ve arkadaşları [44], yatay olarak kırılmış kuyulardan hızlı ve kesin şist gazı üretimi tahmini için tasarlanmış veri odaklı bir model olan ASGA-XGBoost'u sunmaktadır. ASGA, XGBoost modelinin hiper parametrelerini optimize ederek tahmin performansını artırmaktadır. Model, 30 günlük kümülatif gaz üretimini en düşük ortalama mutlak hatayla tahmin ederek diğer yöntemlerden daha iyi performans göstermektedir.

Tran ve arkadaşları [45], XGBoost modelinin hiper parametrelerini optimize etmek için medyan hata kayıp değerlerine dayalı yeni bir grid arama algoritması tanıtmaktadır. Önerilen algoritmanın performansı, Ho Chi Minh City, Vietnam ve Tazmanya, Avustralya'dan alınan günlük elektrik yük verileriyle doğrulanmış olup orijinal grid arama algoritmasına göre daha küçük MSE göstermektedir. Sun ve arkadaşları [46], yük tahmininin doğruluğunu ve verimliliğini artırmak için hiyerarşik kümeleme ve XGBoost'u birleştiren bir yöntem önermektedir. Yöntem, özellik benzerliklerini belirlemek için hiyerarşik kümeleme ve özellik analizi için XGBoost kullanılmaktadır.

2.7. 2024 Yılı Literatürü

Wu ve arkadaşları [47], meteorolojik benzer günleri ve XGBoost modelini kullanarak hidroelektrik tahmin yöntemi sunmaktadır. Meteoroloji ve akış verileri ile hazırlanan benzer gün veri seti, XGBoost modelini eğitmek için kullanılmaktadır. Yöntem, Çin'in Yunnan bölgesinden alınan verilerle doğrulanmış olup yüksek tahmin doğruluğu ve istikrar göstermektedir.

Bashir ve arkadaşları [48], dinamik hava koşulları altında PV güç tahmininin doğruluğunu artırmak için konvolüsyonel sinir ağı (CNN) ve XGBoost modellerini birleştiren hibrit bir tahmin modeli önermektedir. Model, BAE'nin Şarja kentinde 2.88 kW şebeke bağlantılı PV sistemi üzerinde doğrulanmış olup, 44.18 RMSE ve 0.9962 R^2 ile üstün performans göstererek, tek başına XGBoost'a kıyasla tahmin doğruluğunu önemli ölçüde artırmaktadır.

3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, hidroelektrik enerji üretimi tahmin modelinin geliştirilmesinde kullanılan yöntemler ve adımlar detaylandırılmıştır:

- EPIAŞ Şeffaflık Platformu'ndan alınan enerji üretim verileri ve MERRA-2 veri setlerinden alınan meteorolojik veriler Python ile işlenmiştir.
- XGBoost modeli, tarihsel enerji üretim verileri, meteorolojik veriler ve takvim değişkenleri kullanılarak oluşturulmuştur.
- Model, farklı ağaç sayıları ve öğrenme oranı (η) denenerek optimize edilmiştir.
- Modelin doğruluğu ve performansı, belirleme katsayısı (R^2), Ortalama Mutlak Ölçekli Hata (MASE), kök ortalama karesel hata (RMSE) ve ortalama mutlak hata (MAE) gibi istatistiksel performans ölçütleri kullanılarak değerlendirilmiştir.

Bu çalışmanın yapıldığı dizüstü bilgisayar Intel i7-10870H-2,20 GHz işlemci, 64 GB RAM, Nvidia RTX2070 8GB GDDR6 256-Bit ekran kartına sahiptir. Python kodları nvidia-cuda kütüphanesi aracılığıyla grafik kartın üzerinde çalıştırılmıştır.

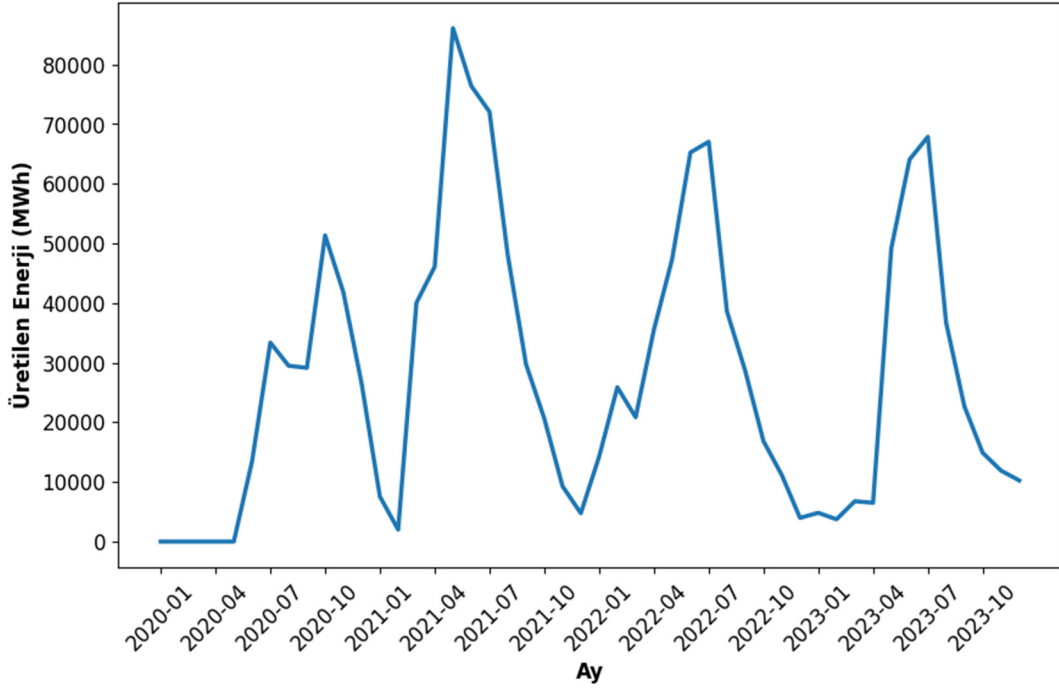
Windows WSL2 sanallaştırma platformunda Ubuntu 22.04.3 işletim sisteminde anaconda platformu üzerinde jupyter notebook, python, xgboost, cuda, cuml, cupy kütüphaneleri kullanılarak model eğitilmiştir.

3.1. Materyal

Bu bölümde, hidroelektrik enerji tahmini için hazırlanan veri setinin ve değişkenlerin detaylı bir tanımlanması yapılmaktadır. Verilerin doğru seçimi ve uygun kategorilere ayrılması, tahmin modelinin başarısını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, girdi değişkenleri enerji üretimi, meteorolojik ve takvim değişkenleri olmak üzere üç ana kategoriye ayrılmıştır. Ayrıca, hedef değişken olarak gerçek üretilen enerji belirlenmiştir.

Girdi değişken kategorileri enerji üretimi, meteorolojik ve takvim değişkenleridir. Enerji üretimi değişkenleri, hidroelektrik santrallerinin performansını anlamak ve gelecekteki enerji üretimini tahmin etmek için kritik öneme sahiptir. Aşağıda, bu değişkenlerin ve veri toplama sürecinin ayrıntıları sunulmaktadır:

- Hedef değişken olarak gerçek üretilen enerji seçilmiştir. Bu, modelin tahmin edeceği ve doğruluğunu belirleyeceği temel değerdir.
- Tarihsel elektrik enerjisi üretim değişkenleri, önceki 1 saat, önceki gün (önceki günün aynı saati) ve önceki hafta (önceki haftanın aynı günü ve saati) verilerini içermektedir. Bu veriler, zaman serisi analizinde kullanılan geçmiş verilerin bir örneğidir ve gelecekteki enerji üretimini tahmin etmede önemli rol oynamaktadır.
- Girdi veri toplama için seçilen dönem 01.01.2020 ile 01.01.2024 arasındadır. Bu dönem, yeterli miktarda veri sağlayarak modelin eğitilmesi ve test edilmesi için uygun bir zaman dilimini kapsamaktadır.
- Enerji üretim verileri EPIAŞ Şeffaflık Platformu'ndan alınmıştır [49]. Bu veriler 2020, 2021, 2022 ve 2023 yıllarını kapsayan saatlik kayıtlar şeklindedir. EPIAŞ verileri, Türkiye'nin enerji piyasasındaki şeffaflığı artırmak amacıyla sağlanan güvenilir ve detaylı verilerden oluşmaktadır.
- Meteorolojik veriler, hidroelektrik enerji üretimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve bu nedenle doğru bir şekilde toplanması ve kullanılması gerekmektedir [50, 51].
- Sıcaklık, radyasyon, nem, rüzgâr, yağış ve kısa dalga radyasyonunu içeren Meteorolojik değişkenler MERRA-2 veri setlerinden alınmıştır.
- Veriler Python scripti ile toplanmış olup, GES DISC portalı 2020, 2021, 2022 ve 2023 yılları için hava durumu verilerini almak amacıyla kullanılmıştır [52].
- Takvim değişkenleri ay, hafta, gün, saat ve gün tipi olarak belirlenmiştir. Bu değişkenler, enerji üretiminin zaman içindeki değişimlerini anlamak ve tahmin modeline dahil etmek için kullanılmıştır. Bu tür değişkenler, modelin doğruluğunu artırmak için önemli katkılar sağlamaktadır.
- 35064 örnek ve 16 değişkenden oluşan veri seti, 0,8/0,2 oranıyla eğitim ve test kümelerine ayrılmıştır. Değişkenler standartlaştırıldı ve eksik değerler ve NA değerleri düzeltilti.



Şekil 4. Aylık üretilen enerji miktarları

3.2. Metot

XGBoost (Extreme Gradient Boosting) algoritması yapılandırılmış verilerin işlenmesindeki hızı nedeniyle bu çalışma için seçilmiştir.

XGBoost, yüksek performans, esneklik ve taşınabilirlik sunmak üzere optimize edilmiş, açık kaynak kodlu bir gradyan artırma kütüphanesidir. Bu kütüphane, gradyan artırma çerçevesinde makine öğrenimi algoritmalarını uygular. XGBoost, paralel ağaç artırma (GBDT - Gradient Boosted Decision Trees veya GBM - Gradient Boosting Machines olarak da bilinir) yöntemiyle birçok veri bilimi problemini hızlı ve doğru bir şekilde çözüme yeteneğine sahiptir [53].

Regresyon, sınıflandırma, sıralama ve kullanıcı tanımlı tahmin problemlerinin çözümünde kullanılabilir. Platformlar arası uyumluluğu vardır. Windows, Linux ve OS X gibi farklı işletim sistemlerinde sorunsuz çalışır. Programlama dili desteği vardır. C++, Python, R, Java, Scala ve Julia gibi başlıca programlama dillerini destekler [54].

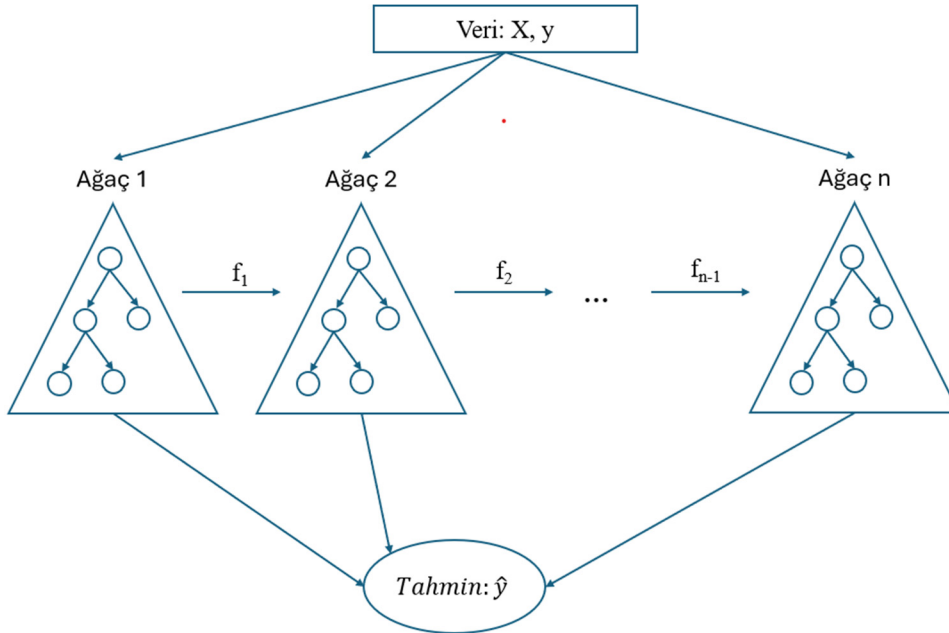
XGBoost, yüksek ölçeklenebilirlik için tasarlanmış, gradyan artırma tabanlı bir karar ağacı topluluğudur ve minimal kaynak kullanımıyla pratik uygulama ölçeğindeki sorunları çözüme kapasitesine sahiptir [10].

XGBoost, çeşitli tahmine dayalı modelleme görevlerindeki etkinliği ile yaygın olarak tanınan ağaç güçlendirmeye yönelik ölçeklenebilir bir makine öğrenimi sistemidir. XGBoost, denetimli öğrenme için kullanılan en iyi performans gösteren algoritmalarından biri olarak bilinen gradyan artırma makinelerinin (GBM) uygulamalarından biridir. Hem regresyon hem de sınıflandırma problemleri için kullanılabilir [12-15].

XGBoost, bir kayıp fonksiyonunu minimize ederek amaç fonksiyonunun eklemeli genişlemesini oluşturur. XGBoost, yalnızca karar ağaçlarını temel sınıflandırıcı olarak kullanması nedeniyle, ağaçların karmaşıklığını yönetmek için değiştirilmiş bir kayıp fonksiyonu kullanılır.

Bir ağaç topluluk modeli, n örnek ve m özellik içeren bir veri kümesi ile K eklemeli fonksiyon kullanarak çıktığı tahmin eder.

$$\hat{y}_i = \phi(x_i) = \sum_{k=1}^K f_k(x_i), f_k \in \mathcal{F} \quad (1)$$



Şekil 5. XGBoost çalışma konsepti

\hat{y}_i tahmin edilen değeri, f_k k . ağaç modelini, x_i girdi özelliğini, K ağaç sayısını ve \mathcal{F} ağaçları içeren fonksiyonel alanı ifade eder. XGBoost'taki amaç fonksiyonu, bir düzenleme terimi içerir.

$$\mathcal{L}(\phi) = \sum_{i=1}^K l(\hat{y}_i, y_i) + \sum_{i=1}^K \Omega(f_k) \quad (2)$$

l tahmin edilen \hat{y}_i ile y_i arasındaki farkı ölçen türevlenebilir bir kayıp fonksiyonudur. İkinci terim ise modelin karmaşıklığını derecelendirir [10].

$$\Omega(f) = \gamma T + \frac{1}{2} \lambda \|w\|^2 \quad (3)$$

T ağacın yaprak sayısını ve w yaprakların çıktı skorlarını ifade eder. Bu kayıp fonksiyonu, karar ağaçlarının bölme kriterine entegre edilerek bir ön budama stratejisine yol açar. Daha yüksek λ değerleri, daha basit ağaçlarla sonuçlanır. γ değeri, bir iç düğümü bölmek için gereken minimum kayıp azaltma kazancını kontrol eder. Ağaçların karmaşıklığı, ağaçların derinliği gibi diğer stratejiler kullanılarak da sınırlandırılabilir.

Ağaç karmaşıklığının azaltılmasının bir başka avantajı, modellerin daha hızlı eğitilebilmesi ve daha az depolama alanı gerektirmesidir. XGBoost'ta, aşırı öğrenmeyi azaltmak ve eğitim süresini kısaltmak için rastgeleştirme teknikleri de kullanılır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

XGBoost modeli hazırlanan veri seti ile eğitilmiştir. Modeli optimize etmek ve sonuçları karşılaştırmak için ağaç sayısı olarak 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000 değerleri ve öğrenme oranı olarak 0.05, 0.10, 0.15, ..., 0.90, 0.95, 1.00 değerleri kullanılmıştır. Bu model varyasyonlarının değerlendirilmesi, hidroelektrik enerji üretiminin tahmin edilmesindeki doğruluk ve güvenilirliklerinin karşılaştırılmasını içermektedir. Çalışmanın performansı çeşitli istatistiksel performans ölçütleri ve hata metrikleri kullanılarak değerlendirilmiştir:

- **Belirleme Katsayısı (R²):** Bağımsız değişkenlerden tahmin edilebilen bağımlı değişkendeki varyans oranını ölçer.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

- **Kök Ortalama Karesel Hata (RMSE):** Tahmin edilen ve gözlemlenen değerler arasındaki karesel farkların ortalamasının karekökü.

$$nRMSE = \frac{100}{\max(y_i) - \min(y_i)} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (5)$$

- **Ortalama Mutlak Hata (MAE):** Tahmin edilen ve gözlemlenen değerler arasındaki mutlak farkların ortalaması.

$$MAE = \frac{100}{\max(y_i) - \min(y_i)} \quad (6)$$

- **Ortalama Mutlak Ölçekli Hata (MASE):** Verilerin ölçeğini hesaba katan ortalama mutlak hatanın ölçeklendirilmiş bir versiyonu.

$$MASE = \frac{MAE}{MAE_{naive}} \quad (7)$$

$$MAE_{naive} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n |y_i - y_{i-1}| \quad (8)$$

- **Ağırlıklı Mutlak Yüzselsel Hata (WAPE):** Mutlak yüzde hatalarını gerçek değerlere göre ağırlıklandırılan ve tahmin doğruluğunun normalleştirilmiş bir ölçüsünü sağlayan bir metrik.

$$WAPE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{\sum_{i=1}^n |y_i|} \quad (9)$$

Çizelge 1’de görüldüğü gibi R² ve RMSE sonuçları modelin doğruluk ve güvenilirliğini yansıtmaktadır. Yüksek R² ve düşük RMSE değerleri, modelin hidroelektrik enerji üretimini doğru bir şekilde tahmin edebildiğini göstermektedir. Özellikle, öğrenme oranı 0.1 ve ağaç sayısı 1000 olan model, en iyi performansı sergilemiştir.

Çizelge 1. Performans sonuçları

Öğrenme oranı	Ağaç sayısı	RMSE (MWh)	R ² (%)	MAE (MWh)	MASE	WAPE (%)	Hesaplama süresi (s)
0.1	1000	7.293	96.138	3.043	0.074	7.712	4.902
Ortalama	Ortalama	7.928	95.419	3.709	0.090	9.398	2.565

Çalışmanın sonuçları, XGBoost modelinin hidroelektrik enerji üretimini tahmin etmede etkili bir araç olduğunu göstermektedir. Farklı parametreler kullanılarak yapılan optimizasyonlar, modelin performansını önemli ölçüde iyileştirmiştir. Bu bulgular, hidroelektrik santrallerinin enerji üretim tahminlerinin doğruluğunu artırmak ve enerji planlaması süreçlerini iyileştirmek için kullanılabilir. Bulguların genel olarak enerji üretim tahmininde kullanılabilirliği, modelin doğruluk ve güvenilirliğine bağlıdır.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, XGBoost modelinin pratik uygulamalarda kullanılabilir olduğunu ve enerji üretim tahminlerinde güvenilir sonuçlar sağladığını göstermektedir.

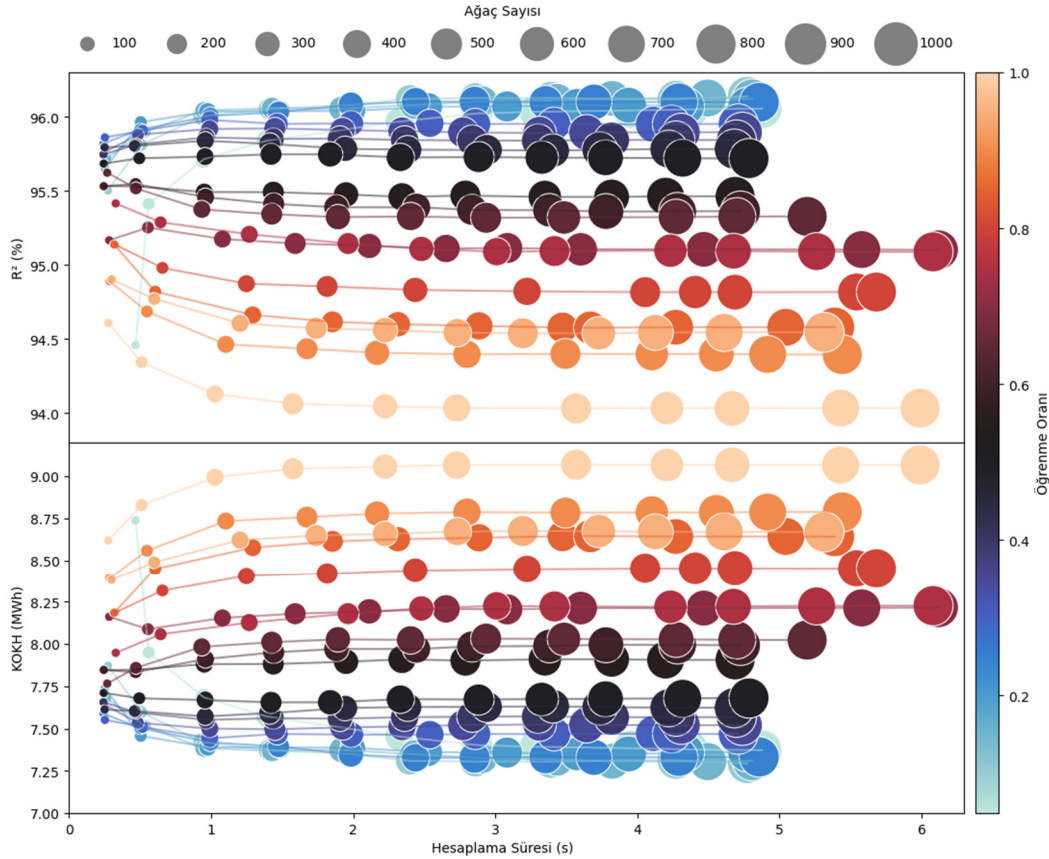
5. SONUÇLAR

Araştırma, hidroelektrik enerji üretimini doğru bir şekilde tahmin etmek için XGBoost gibi gelişmiş makine öğrenimi tekniklerinin potansiyelini ortaya koymaktadır. Çeşitli giriş parametrelerinin bütünlleştirilmesi ve modelin performansının optimize edilmesiyle, stratejik enerji planlaması ve yönetimi için yüksek doğruluk seviyelerine ulaşmak mümkündür.

Bu yöntem, hidroelektrik santrallerinin verimli işletilmesini desteklerken, aynı zamanda karbon emisyonlarını azaltma ve çevresel dengeyi koruma gibi daha geniş hedeflere de katkı sağlamaktadır.

Çalışmanın bulguları, yenilenebilir enerji kaynaklarının öngörülebilirliğini ve güvenilirliğini artırmak için veri odaklı modellerin önemini vurgulamakta ve daha sürdürülebilir enerji sistemlerine geçişi desteklemektedir.

Araştırma, hidroelektrik enerji tahmini konusundaki anlayışımızı ilerletmekte ve enerji sektöründeki karar vericiler için pratik çözümler sunmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına artan talebi karşılamak için tahmin modellerine XGBoost gibi makine öğrenmesi algoritmalarının entegrasyonu kritik öneme sahiptir. Gelecek araştırmalar, AI tabanlı algoritmalar ve optimizasyon tekniklerini daha da geliştirerek çeşitli operasyonel ortamlarda tahmin doğruluğunu artırmayı hedefleyebilir.



Şekil 6. R^2 ve RMSE sonuçları

6. KAYNAKLAR

1. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, *Elektrik Bilgi Merkezi*, <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik>, Erişim tarihi: 23.09.2024.
2. Acaroğlu, H., Kartal, H. M. & García Márquez, F. P. (2023). Testing the environmental Kuznets curve hypothesis in terms of ecological footprint and CO2 emissions through energy diversification for Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(22), 63289-63304.

3. Cassagnole, M., Ramos, M.-H., Zalachori, I., Thirel, G., Garçon, R., Gailhard, J. & Ouillon, T. (2021). Impact of the quality of hydrological forecasts on the management and revenue of hydroelectric reservoirs – a conceptual approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(2), 1033-1052.
4. IEA, *Energy Statistics Data Browser*, <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser>, Erişim tarihi: 20.09.2024.
5. EÜAŞ Aslantaş HES. <https://www.euas.gov.tr/santraller/aslantas-hes>. Erişim tarihi: 20.09.2024.
6. Hamel, P., Bremer, L.L., Ponette-González, A.G., Acosta, E., Fisher, J.R.B., Steele, B., Cavassani, A. T., Blanski, E. & Brauman, K.A. (2020). The value of hydrologic information for watershed management programs: The case of Camboriú, Brazil. *Science of The Total Environment*, 705, 135871.
7. Ercüment Beyhun, N., Altıntaş, K.H. & Noji, E. (2005). Analysis of registered floods in Turkey. *International Journal of Disaster Medicine*, 3(1-4), 50-54.
8. O'Connor, R.E., Yarnal, B., Dow, K., Jocoy, C.L. & Carbone, G.J. (2005). Feeling at risk matters: water managers and the decision to use forecasts. *Risk Analysis*, 25(5), 1265-1275.
9. Özesmi, U. & Özesmi, S. (2003). A participatory approach to ecosystem conservation: fuzzy cognitive maps and stakeholder group analysis in uluabat lake, Turkey. *Environmental Management*, 31(4), 518-531
10. Chen, T. & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 785-794. New York, NY, USA: ACM.
11. Anghileri, D., Monhart, S., Zhou, C., Bogner, K., Castelletti, A., Burlando, P. & Zappa, M. (2019). The Value of Subseasonal Hydrometeorological Forecasts to Hydropower Operations: How Much Does Preprocessing Matter? *Water Resources Research*, 55(12), 10159-10178.
12. Kumar, V., Kedam, N., Sharma, K.V., Mehta, D.J. & Caloiero, T. (2023). Advanced machine learning techniques to improve hydrological prediction: a comparative analysis of streamflow prediction models. *Water*, 15(14), 2572.
13. Szczepanek, R. (2022). Daily streamflow forecasting in mountainous catchment using XGBoost, LightGBM and CatBoost. *Hydrology*, 9(12), 226.
14. Tayfur, G., Singh, V., Moramarco, T. & Barbetta, S. (2018). Flood hydrograph prediction using machine learning methods. *Water*, 10(8), 968.
15. Hao, R. & Bai, Z. (2023). Comparative study for daily streamflow simulation with different machine learning methods. *Water*, 15(6), 1179.
16. Zhang, D., Qian, L., Mao, B., Huang, C., Huang, B. & Si, Y. (2018). A Data-driven design for fault detection of wind turbines using random forests and XGBoost. *IEEE Access*, 6, 21020-21031.
17. Liu, Y., Luo, H., Zhao, B., Zhao, X. & Han, Z. (2018). Short-term power load forecasting based on clustering and XGBoost method. *2018 IEEE 9th International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS)*, Beijing, China.
18. Zheng, H. & Wu, Y. (2019). A XGBoost model with weather similarity analysis and feature engineering for short-term wind power forecasting. *Applied Sciences*, 9(15), 3019.
19. Abbasi, R.A., Javaid, N., Ghuman, M.N.J., Khan, Z.A., Ur Rehman, S. & Amanullah (2019). Short term load forecasting using XGBoost, 1120-1131.
20. Suo, G., Song, L., Dou, Y. & Cui, Z. (2019). Multi-dimensional short-term load forecasting based on XGBoost and fireworks algorithm. *2019 18th International Symposium on Distributed Computing and Applications for Business Engineering and Science (DCABES)*, Wuhan, China.
21. Li, C., Chen, Z., Liu, J., Li, D., Gao, X., Di, F., Li, L. & Ji, X. (2019). Power load forecasting based on the combined model of LSTM and XGBoost. *PRAI '19: Proceedings of the 2019 the International Conference on Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, New York, NY, USA: ACM.
22. Liao, X., Cao, N., Li, M. & Kang, X. (2019). Research on short-term load forecasting using XGBoost based on similar days. *2019 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS)*, 675-678, Changsha, China.
23. Guo, X., Gao, Y., Zheng, D., Ning, Y. & Zhao, Q. (2020). Study on short-term photovoltaic power prediction model based on the Stacking ensemble learning. *Energy Reports*.
24. Phan, Q.-T., Wu, Y.-K. & Phan, Q.-D. (2020). A comparative analysis of XGBoost and temporal convolutional network models for wind power forecasting.
25. Al Rayess, H.M. & Ülke Keskin, A. (2021). Forecasting the hydroelectric power generation of GCMs using machine learning techniques and deep learning (Almus Dam, Turkey). *Geofizika*, 38(1), 1-14.
26. Zhang, K., Gu, C., Gu, C., Zhu, Y., Chen, S., Dai, B. & Li, Y. (2021). A novel seepage behavior prediction and lag process identification method for concrete dams using HGWO-XGBoost model. *IEEE Access*.

27. Ma, M., Zhao, G., He, B., Li, Q., Dong, H., Wang, S. & Wang, Z. (2021). XGBoost-based method for flash flood risk assessment. *Journal of Hydrology*, 598, 126382.
28. Osman, A.I.A., Ahmed, A.N., Chow, M.F., Huang, Y.F. & El-Shafie, A. (2021). Extreme gradient boosting (XGBoost) model to predict the groundwater levels in Selangor Malaysia. *Ain Shams Engineering Journal*.
29. Zhang, W., Wei, Z., Wang, H., Hanyong, W., Lin, Y., Yemin, L., Liu, W. & An, X. (2021). Reservoir inflow predicting model based on machine learning algorithm via multi-model fusion: A case study of Jinshuitan river basin. *IET Cyber-Systems and Robotics*.
30. Bae, D.-J., Kwon, B.-S. & Song, K.-B. (2021). XGBoost-based day-ahead load forecasting algorithm considering behind-the-meter solar PV generation. *Energies*, 15(1), 128.
31. Wang, Y., Sun, S., Chen, X., Zeng, X., Kong, Y., Chen, J., Guo, Y. & Wang, T. (2021). Short-term load forecasting of industrial customers based on SVM and XGBoost. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*.
32. Phan, Q.-T., Wu, Y.-K. & Phan, Q.-D. (2021). Short-term solar power forecasting using XGBoost with numerical weather prediction. *IEEE International Future Energy Electronics Conference*, Taipei, Taiwan.
33. Phan, Q.T., Wu, Y.K. & Phan, Q.D. (2021). A hybrid wind power forecasting model with XGBoost, data preprocessing considering different NWP. *Applied Sciences*, 11(3), 1100.
34. Wang, B., Li, T., Xu, N., Zhou, H., Xiong, Z. & Long, W. (2021). A novel reservoir modeling method based on improved hierarchical XGBoost. *2021 IEEE 5th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, Chongqing, China.
35. Udo, W. & Muhammad, Y. (2021). Data-driven predictive maintenance of wind turbine based on SCADA data. *IEEE Access*, 9, 162370-162388.
36. Chen, Z., Xiao, J., Chen, S., Qiao, H., Chen, J. & Xu, X. (2022). Shaft run-out trend prediction of water turbine generators and fault identification of hydroelectric units based on XGBoost algorithm. *International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, Changsha, China.
37. Fan, L., Wang, Y., Fang, X. & Jiang, J. (2022). To predict the power generation based on machine learning method. *Journal of Physics: Conference Series*, 2310(1), 012084.
38. Singh, U. & Rizwan, M. (2022). SCADA system dataset exploration and machine learning based forecast for wind turbines. *Results in Engineering*, 16, 100640.
39. Xue, J., Hu, X., Chen, H. & Zhou, G. (2022). Research on LSTM-XGBoost integrated model of photovoltaic power forecasting system.
40. Mohamed, M., Mahmood, F.E., Abd, M.A., Chandra, A. & Singh, B. (2022). Dynamic forecasting of solar energy microgrid systems using feature engineering. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 58(6), 7857-7869.
41. Xiong, X., Guo, X., Zeng, P., Zou, R. & Wang, X. (2022). A short-term wind power forecast method via XGBoost hyper-parameters optimization. *Frontiers in Energy Research*, 10.
42. Wang, J., Gao, Z. & Ma, Y. (2022). Prediction model of hydropower generation and its economic benefits based on EEMD-ADAM-GRU fusion model. *Water*, 14(23), 3896.
43. Hong, Y., Yang, J., Yang, Z. & Yan, J. (2023). PV power prediction based on XGBoost algorithm. *2023 IEEE 5th International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCSIT)*, 930-933. IEEE.
44. Zou, Y., Chen, H., Zhang, Y., Wang, Z., Pang, L., Lan, X., Yitong, Z., Wang, B. & Peng, R. (2023). Multimode hydropower power prediction based on long short-term memory. *Sixth International Conference on Computer Information Science and Application Technology (CISAT 2023)*, Hangzhou, China.
45. Tran, N.T., Tran, T.T.G., Nguyen, T.A. & Lam, M.B. (2023). A new grid search algorithm based on XGBoost model for load forecasting. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 12(4), 1857-1866.
46. Sun, S., Xing, J., Cheng, Y., Yu, P., Wang, Y., Yang, S. & Wang, S. (2023). Features analysis and prediction of electric load based on clustering and XGBoost. *Second International Conference on Energy, Power, and Electrical Technology (ICEPET 2023)*, Kuala Lumpur, Malaysia.
47. Wu, Y., Xie, Y., Xu, F., Zhu, X. & Liu, S. (2024). A runoff-based hydroelectricity prediction method based on meteorological similar days and XGBoost model. *Frontiers in Energy Research*, 11.
48. Bashir, S.B., Farag, M.M., Hamid, A.K., Adam, A.A., Abo-Khalil, A.G. & Bansal, R. (2024). A novel hybrid CNN-XGBoost model for photovoltaic system power forecasting. *2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering*, Moscow, Russian Federation.

49. EPIAŞ, *Şeffaflık Platformu Gerçek Zamanlı Elektrik Üretim Verisi*, <https://seffaflik.epias.com.tr/electricity/electricity-generation/ex-post-generation/real-time-generation>, Erişim tarihi: 23.09.2024.
50. Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) (2015). *MERRA-2 inst1_2d_asm_Nx: 2d, 1-Hourly, Instantaneous, Single-Level, Assimilation, Single-Level Diagnostics V5.12.4*. Greenbelt, MD, USA: Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). Erişim tarihi: 23.09.2024.
51. Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) (2015). *MERRA-2 tavg1_2d_rad_Nx: 2d, 1-Hourly, Time-Averaged, Single-Level, Assimilation, Radiation Diagnostics V5.12.4*. Greenbelt, MD, USA: Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). Erişim tarihi: 23.09.2024.
52. Aiken, E. (2018). *Script to download data from MERRA-2 database based on lat/lon coordinates*. Github. <https://github.com/emilylaiken/merradownload>, Erişim tarihi: 01.03.2024.
53. DMLC, *eXtreme Gradient Boosting*. Distributed (Deep) Machine Learning Community, <https://github.com/dmlc/xgboost>, Erişim tarihi: 28.05.2024.
54. Morde, V. & Setty, A., *XGBoost Algorithm: Long May She Reign! Towards Data Science*. <https://towardsdatascience.com/https-medium-com-vishalmorde-xgboost-algorithm-long-she-may-rein-edd9f99be63d>, Erişim tarihi: 23.09.2024.

Assessment of the Change in Hardness of Particulated Intraply Carbon/Aramid Reinforced Composites After UV Aging

Zeynal Abidin OĞUZ^{1,2,a}

¹Adıyaman University, Department of Mechanical Engineering, Adıyaman, Türkiye

¹Adıyaman University, Besni Ali Erdemoğlu Vocational School, Mechatronics Department, Adıyaman, Türkiye

^aORCID: 0000-0002-8566-2331

Article Info

Received : 01.01.2025

Accepted : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1666067

Corresponding Author

Zeynal Abidin OĞUZ

zoguz@adiyaman.edu.tr

Keywords

Nanoclays

Intraply hybrid

Hardness test

UV aging

How to cite: OĞUZ, Z.A., (2025). Assessment of the Change in Hardness of Particulated Intraply Carbon/Aramid Reinforced Composites After UV Aging. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(1), 219-226.

ABSTRACT

This work examines how the hardness characteristics of intraply carbon/aramid hybrid composites are affected by UV aging and nanoclay addition. After being produced with different weight percentages of nanoclay (0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, and 3.0%), the samples were exposed to UV aging for 0, 450, and 900 hours. In comparison to unreinforced samples, nanoclay reinforcement dramatically increased the surface hardness, as demonstrated by increases of 4.69%, 17.19%, 27.73%, 31.25%, and 32.81% for 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, and 3.0% nanoclay content, respectively, according to hardness tests. In addition, it was determined that there was an increase in the hardness value of the samples at the end of UV aging. The increase in hardness values continued as the UV aging time increased. These results indicate that nanoclay reinforcement synergistically interacts with UV-induced molecular changes to enhance surface hardness, with diminishing returns observed at higher nanoclay contents.

UV Yaşlandırma Sonrası Parçacıklı Katman İçi Karbon/Aramid Takviyeli Kompozitlerin Sertlik Değişiminin Değerlendirilmesi

Makale Bilgileri

Geliş : 01.01.2025

Kabul : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1666067

Sorumlu Yazar

Zeynal Abidin OĞUZ

zoguz@adiyaman.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Nanokil

Katman içi hibrit

Sertlik testi

UV yaşlanma

Atf şekli: OĞUZ, Z.A., (2025). UV Yaşlandırma Sonrası Parçacıklı Katman İçi Karbon/Aramid Takviyeli Kompozitlerin Sertlik Değişiminin Değerlendirilmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(1), 219-226.

ÖZ

Bu çalışmada, katman içi karbon/aramid hibrit kompozitlerin sertlik özelliklerinin UV yaşlanması ve nanokil ilavesiyle nasıl etkilendiği incelenmiştir. Farklı ağırlık yüzdelerinde nanokil ile üretildikten sonra (%0, %0,5, %1,0, %1,5, %2,0 ve %3,0), numuneler 0, 450 ve 900 saat UV yaşlanmasına maruz bırakılmıştır. Nanokil takviyesi, takviyesiz numunelere kıyasla yüzey sertliğini önemli ölçüde artırmıştır. Sertlik testlerine göre, sırasıyla %0,5, %1,0, %1,5, %2,0 ve %3,0 nanokil içeriği için %4,69, %17,19, %27,73, %31,25 ve %32,81'lik artışlar görülmüştür. Ayrıca, UV yaşlanması sonunda numunelerin sertlik değerlerinde bir artış olduğu belirlenmiştir. Sertlik değerlerindeki artış UV yaşlanma süresi arttıkça devam etmiştir. Bu sonuçlar nanokil takviyesinin yüzey sertliğini artırmak için UV kaynaklı moleküler değişikliklerle sinerjik olarak etkileşime girdiğini ve daha yüksek nanokil içeriklerinde azalan getiriler gözlemlendiğini göstermektedir.

1. INTRODUCTION

Composite materials are essential in modern engineering and manufacturing due to their unique ability to combine the strengths of different materials, resulting in superior mechanical, thermal, and chemical properties. They offer high strength-to-weight ratios, excellent corrosion resistance, and design flexibility, making them indispensable in industries such as aerospace, automotive, construction, and renewable energy. By tailoring the matrix and reinforcement components, composites can be engineered to meet specific performance requirements, enabling innovations in high-performance and sustainable applications. Their versatility and adaptability continue to drive advancements in technology and material science [1-3]. Composite materials are widely used in applications exposed to outdoor environments, such as aerospace, automotive, and construction, where ultraviolet (UV) radiation is a significant aging factor. Prolonged exposure to UV radiation can degrade the polymer matrix through photodegradation, leading to surface discoloration, microcracking, and loss of mechanical properties such as tensile strength and stiffness. Understanding the effects of UV aging is critical for predicting the long-term durability and reliability of composites in such conditions. By simulating UV exposure in controlled environments, researchers can evaluate material performance, identify failure mechanisms, and develop strategies to enhance UV resistance through optimized formulations, coatings, or stabilizers. This knowledge is essential for designing composite materials that maintain their structural integrity and aesthetic quality throughout their service life, ensuring safety and compliance with industry standards [4,5].

Hardness testing is a critical evaluation method for composite materials as it provides insights into their resistance to surface deformation, wear, and penetration under applied loads. This property is especially important for composites used in applications subjected to abrasive or high-contact conditions, such as aerospace, automotive, and protective equipment. By assessing hardness, researchers can predict the material's durability, optimize formulations, and ensure its suitability for demanding operational environments. The results from hardness tests also complement other mechanical evaluations, offering a comprehensive understanding of the composite's performance [6,7].

In the literature, some researches have investigated the impact of particle reinforcement on the surface hardness of composite materials. Moreover, some studies have investigated the effect of size on the hardness of the samples. Akaluzia et al. [1] studied the effect of wood charcoal particles (HWCP) on the hardness properties of polyester matrix composites. Samples were prepared with additive ratios varying between 5-30% by weight. In addition, the change in hardness values under the effect of particle size was investigated using 75, 150, 250, and 300 μm sizes for each ratio. According to the test results, hardness values increase inversely proportional to particle sizes; maximum hardness was obtained at 150 μm size and 20% weight percentage. In general, as the particle reinforcement ratio increased, the hardness value increased compared to the control group.

Raja et al. [2] assessed the effect of fly ash filler size on the mechanical properties of polymer matrix composites (PMC) reinforced with epoxy resin. Four different fly ash filler sizes (50 μm , 480 nm, 350 nm, and 300 nm) were incorporated at a 10% weight ratio, with particle size reduction achieved through ball milling. Mechanical tests, including hardness and Charpy impact strength, were conducted following ASTM standards. The results demonstrated that reducing the filler size enhanced the hardness and impact strength of the composites. The 300 nm filler size yielded the highest hardness (35 Hv) and impact energy (14 J), attributed to improved filler-matrix adhesion and reduced voids. The study highlights the potential of optimizing filler size to improve the performance of particulate-reinforced polymer composites, offering insights for applications in lightweight and durable materials.

Wachter et al. [3] evaluated the hardness properties of transparent wood composites after UV exposure. The samples were subjected to aging for 35 days and the hardness values were measured every 7 days. The hardness values showed a decreasing trend until the end of 28 days, but then increased again. However, the authors stated that this change was not significant.

Girimurugan et al. [4] investigated the hardness values of composite samples containing camellia sinensis particles varying between 2-6%. According to the results, the hardness values of 2, 4 and 6 wt% samples increased by 25, 87.5 and 182.5%, respectively, compared to samples without particle reinforcement.

Ramli et al. [5] searched the effects of UV curing exposure time on the mechanical and physical properties of epoxy and vinyl ester fiberglass laminate composites. Using two photoinitiators-Bisacyl Phosphine Oxide (BAPO) and Alpha Hydroxyl Ketone (AHK)-the laminates were cured under UV light for varying durations. Key tests, including density, tensile strength, hardness, and morphological analysis, were conducted to assess performance. The results revealed that epoxy composites cured faster and achieved superior mechanical properties compared to vinyl ester composites, which required additional curing time for full hardening. Increased UV exposure time improved density due to reduced voids but led to diminished tensile strength and hardness after optimal exposure due to material degradation.

The hardness of carbon fiber/epoxy (CFRP) samples that were exposed to ultraviolet light for 80 days was tested by Shi et al. [6]. It was found that ultraviolet (UV) light had little effect on the fibers' hardness, which remained comparatively constant during the course of aging. On the other hand, the matrix material exhibited a noticeable embrittlement impact and an enormous rise in hardness after UV aging. Following 40 days of UV exposure, the matrix phase showed a significant rise in hardness, increasing by as much as 35% as a result of embrittlement from UV-induced molecular modifications. Hardness started to decrease with further exposure after this peak.

Dulebova et al. [7] investigated the hardness changes of polypropylene (PP) composites when exposed to UV rays and low temperatures. In the study, 10% to 50% talc and chalk were used as fillers, and 4% montmorillonite (MMT) was added. The hardness changes of the polymer composites were measured by Shore hardness test. It was observed that as the filler content increases, hardness, strength and other mechanical properties increase. UV exposure for 720 h did not cause any significant change in hardness. A slight increase in hardness was observed in PP/ chalk composites, while a slight decrease in hardness was observed in PP/talc composites. Minimal changes in hardness were also observed in tests performed at 20°C.

Sahu et al. [8] studied the effects of UV exposure on mechanical properties of HDPE reinforced with carbon black. Carbon black acts as a UV stabilizer and was studied at three different loading rates (1%, 2% and 3%). All samples were exposed to UV light for 192 hours. At the end of aging, the surface hardness decreased by 3.28% for 1% reinforcement ratio, while it increased by 3.28% and 1.64% for 2% and 3% reinforcement ratios, respectively.

Oğuz et al. [9] evaluated the impact properties of particulated intaply hybrid carbon/aramid composites after UV aging. Samples were kept in a UV cabin for 0, 450, and 900 hours. The effects of aging time and hybridization effect on impact properties were evaluated experimentally. In this study, the extension of aging time caused an increase in hardness values. Although the toughness values decreased after 450 hours of UV aging for each reinforcement ratio, the extension of the UV aging period caused an increase in this value.

In this study, carbon/aramid intraply hybrid composite samples were reinforced with varying nanoclay contents of 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, and 3.0% by weight, offering a systematic exploration of the effects of nanoclay on composite performance. Unlike previous studies that primarily focus on short-term UV exposure or single filler concentrations, this research subjected the samples to prolonged UV aging for 0, 450, and 900 hours, simulating extended environmental effect. The hardness values of the composites were measured post-UV exposure, providing critical insights into the role of nanoclay reinforcement in mitigating the effects of UV-induced material characterization. This approach not only bridges the gap in the existing literature but also establishes a comprehensive understanding of the durability and performance of hybrid composites under extended UV aging conditions.

2. MATERIALS AND METHOD

2.1. Composite Plate Production

Carbon/aramid twill fabric was used as the reinforcing material for this study. The epoxy resin MGS L 160 and the hardener MGS H 160 were mixed at a stoichiometric mass ratio of 100:25 to produce the composite samples. The fabric and chemicals required to create the laminates were supplied by Dost Kimya (Turkey),

while the nanoparticles were supplied by Grafen Kimya (Turkey). The physical properties of these materials are listed in Table 1.

Table.1 Physical properties of materials

Material	Specifications	Dimensions
Carbon/aramid intraply fabric	Areal density	210 g/m ²
	Fiber thickness	0.12 mm
Epoxy resin MGS L160	Density	1.13-1.17 g/m ³
	Viscosity	700-900 mPas
	Flexural strength	110-140 (N/mm ²)
	Modulus of elasticity	3.2-3.5 (kN/mm ²)
	Tensile strength	70-80 (N/mm ²)
Nanoclay	Impact strength	40-50 (kJ/m ²)
	Lateral width	0.5-2 μm
	Thickness	1-10 nm
	Bulk density	200-500 kg/m ³

The approach of making specimens consists of two procedures. An MGS L 160-particle combination with different weight percentages of nano-clay (0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, and 3.0 wt.%) was first mixed using an ultrasonic mixer adjusted at 8000 rpm. The combination was then mixed further until it was homogeneous following the addition of MGS H 160. The next step was to arrange Twelve hybrid carbon/aramid fabrics, each cut to 50 × 50 (cm²) dimensions, on a flat surface with a layering angle of 0°/90°. The entire combination is then fed into the hybrid fabrics using a tiny hand roller. To make sure the epoxy-saturated laminated composites wouldn't deform at an appropriate pressure, the complete layout was kept at 700 mm-Hg vacuum pressure for 360 min. The laminates were then kept at 40°C for 120 minutes and cooled for a full day in order to finish the curing process. An operation diagram representation is shown in Figure 1. As per ASTM standards, the test pieces were CNC-cut to acquire specific sizes for hardness test after the laminates were produced.

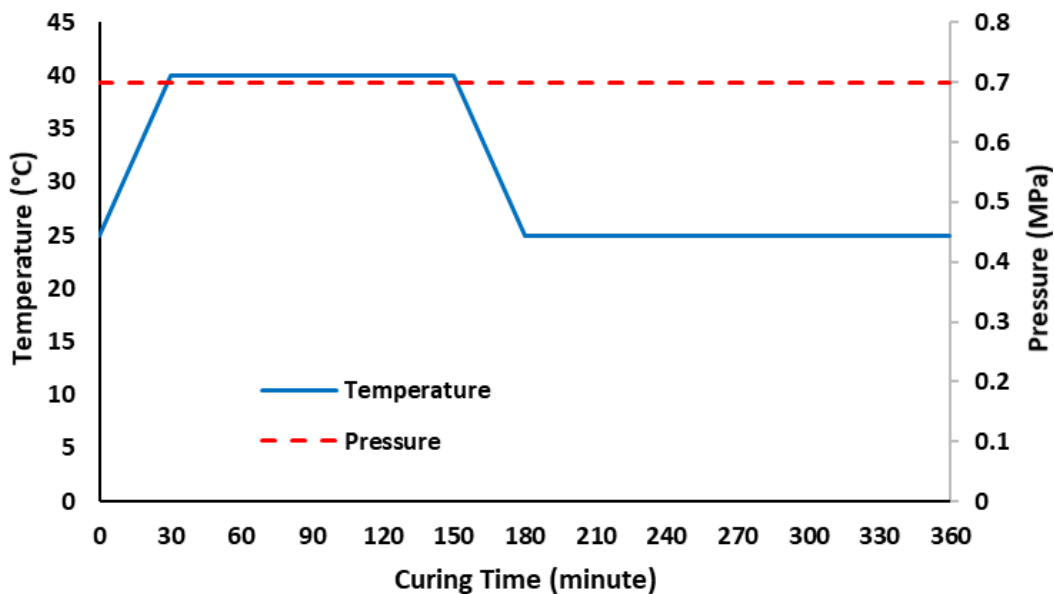


Figure 1. Composite plate production condition

2.2. UV Aging

The test samples were exposed to UV light in a QUV test chamber, which produces a radiation spectrum centered in the ultraviolet wavelengths, in accordance with standard ASTM G154 [10]. Test specimens were kept in chamber for 0, 450, and 900 hours at 50± 2°C.

2.3. Evaluation of Hardness Test

In order to determine the hardness of nanoclay filled intraply carbon/aramid composite material, a little load is applied first, after which is a significant load, and the level of penetration is then noted. Vickers hardness's primary benefit is its immediate presentation of hardness values, which eliminates the need for laborious computations that are a part of other hardness measuring methods. Usually, it is employed in metallurgy and engineering. Its tiny area of indentation, resolution, toughness, quickly, and dependability are the reasons behind its commercial prominence. The test piece's thickness must be at least ten times the indentation's depth in order to obtain a trustworthy result. Additionally, since convex surfaces provide lower measurements, tests should be made from a level, perpendicular surface. The Vickers hardness test, which followed ASTM E92-17, was used to assess the surface hardness of the composite samples. It was carried out using a standard Vickers hardness testing equipment that had a diamond pyramid-shaped indenter. For a duration of 10 seconds, the load was delivered to the sample surface using the indenter. After the load was removed, the diagonals of the resulting indentation were measured using an optical microscope integrated with the testing apparatus. Each specimen had fifteen measurements made at various points to guarantee accuracy, and a median result was given. The impact of UV aging and nanoclay reinforcement on the surface hardness of the composites could be evaluated thanks to the accurate and dependable hardness values this approach produced. The regular diamond shape for hardness test and hardness test device are shown in Figure 2 a) and b), respectively.

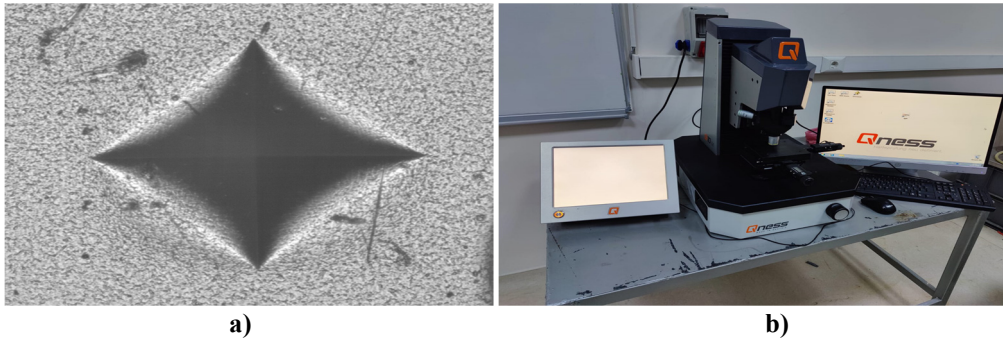


Figure 2. a) Regular diamond shape for hardness test b) Hardness test device

The samples utilized in this investigation were coded. For example, for the code S0.5-450, S is abbreviation for specimen, 0.5 represents the nanoclay reinforcement ratio and 450 represents UV aging time (450 hours).

3. RESULTS AND DISCUSSION

The impact of nanoparticle adding on the hardness of intraply carbon/aramid hybrid samples was systematically evaluated. The hardness values and change rates of the samples for each case are clearly seen in Figure 3. The composites were prepared with nanoclay weight fractions of 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, and 3.0%, and their hardness values were measured. The results demonstrated a significant improvement in hardness with the addition of nanoclay compared to the unreinforced samples. Specifically, the hardness values for the composites with 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, and 3.0% nanoclay content exhibited increases of 4.69%, 17.19%, 27.73%, 31.25%, and 32.81%, respectively, relative to the unreinforced samples. This trend indicates that the incorporation of nanoclay enhances the resistance of the composite matrix to surface deformation, which can be attributed to the improved dispersion of nanoclay particles and their interaction with the polymer matrix [7,21]. The most substantial increase in hardness was observed at 3.0% nanoclay content, suggesting that the reinforcement was effective in enhancing the load-bearing capacity of the matrix [18,19]. Further, due to the nanoclay strengthens the polymer's ability to resist plastic deformation, it boosts the samples' hardness [9]. However, the diminishing rate of improvement beyond 2.0% indicates that the material may be approaching a saturation point, where further addition of nanoclay provides minimal incremental benefits. These findings underscore the critical role of nanoclay content in optimizing the mechanical properties of hybrid composites and provide valuable insights for their application in environments demanding high surface hardness.

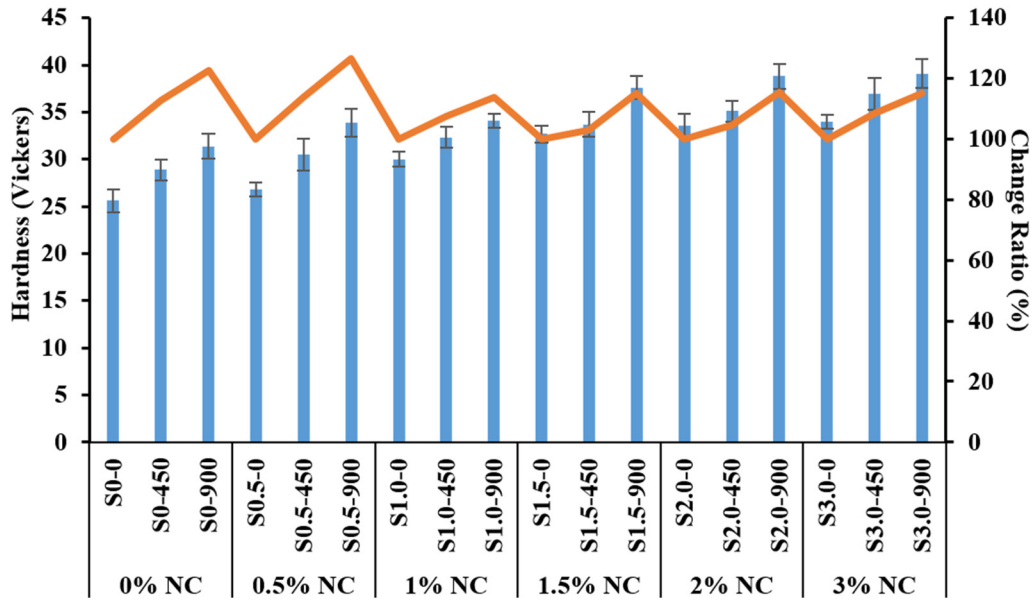


Figure 3. Hardness values and change ratios of samples

The influence of UV aging on the hardness of intraply carbon/aramid hybrid composites with varying nanoclay content (0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, and 3.0%) was systematically examined over 450 and 900 hours of exposure. The results reveal a notable increase in hardness values after UV aging, indicating the embrittlement effect induced by prolonged UV exposure [12,16,20]. At 450 hours of UV aging, all samples exhibited increased hardness compared to the control group. The hardness values for S0, S0.5, S1.0, S1.5, S2.0, and S3.0 samples increased by 12.89%, 13.81%, 7.67%, 3.06%, 4.46%, and 8.83%, respectively. This trend suggests that UV aging enhances the surface hardness due to the crosslinking and densification effects in the matrix caused by UV-induced molecular changes [15,20]. However, the lower increase observed for higher nanoclay contents (e.g., S1.5 and S2.0) may indicate that the reinforcement already contributes significantly to hardness, leaving less room for further enhancement through UV aging. At 900 hours of UV exposure, hardness values continued to rise compared to both the control group and the 450-hour results. The hardness values for S0, S0.5, S1.0, S1.5, S2.0, and S3.0 increased by 22.66%, 26.49%, 13.67%, 14.98%, 15.48%, and 15.0%, respectively. The progressive increase in hardness with prolonged UV exposure highlights the cumulative embrittlement effect, with the matrix becoming increasingly rigid over time. Notably, samples with higher nanoclay content (S2.0 and S3.0) showed relatively stable but significant improvements, indicating that nanoclay reinforcement synergistically interacts with UV-induced changes to enhance surface hardness. [12,20] These findings demonstrate that UV aging not only enhances the surface hardness of hybrid composites but also highlights the critical role of nanoclay content and aging duration in influencing the mechanical properties of these materials. The results provide valuable insights for designing composites for long-term outdoor applications where UV exposure is a critical factor.

4. CONCLUSION

This work examined how the hardness characteristics of intraply carbon/aramid hybrid composites were affected by UV aging and nanoclay reinforcement. In comparison to unreinforced samples, the addition of nanoclay at weight fractions of 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, and 3.0% considerably increased surface hardness, with increases of 4.69%, 17.19%, 27.73%, 31.25%, and 32.81%, respectively. These results demonstrate how well nanoclay works to increase the composite matrix's load-bearing capability. All samples' hardness levels were further increased by UV aging. Hardness increases for S0, S0.5, S1.0, S1.5, S2.0, and S3.0 were 12.89%, 13.81%, 7.67%, 3.06%, 4.46%, and 8.83%, respectively, following 450 hours of UV exposure. More significant increases occurred after 900 hours of exposure, reaching 22.66%, 26.49%, 13.67%, 14.98%, 15.48%, and 15.0% for the same specimens, respectively. These findings show a substantial relationship between surface hardness and UV aging duration, which is explained by UV-induced embrittlement effects and molecular crosslinking in the polymer matrix. The results imply that UV aging and nanoclay reinforcement work in concert to improve the mechanical performance of hybrid composites. Intermediate nanoclay concentrations and extended UV exposure produced the best combination of

endurance and reinforcing, whereas greater nanoclay levels shown declining returns in hardness enhancement. These findings serve as a basis for creating hybrid composites that are appropriate for long-term outdoor applications and have improved hardness and UV resistance. To increase the range of applications for these materials, further research might examine other mechanical characteristics including fatigue behavior and impact resistance.

5. REFERENCES

1. Erkek, B., Kosedag, E. & Adin, H. (2024). Hybridization effect on energy absorption capacity of composite crash boxes. *Polymer Composites*, 45(13), 1-12.
2. Bulut, M., Bozkurt, Ö.Y., Erklığ, A., Yaykaşlı, H. & Özbek, Ö. (2020). Mechanical and dynamic properties of basalt fiber-reinforced composites with nanoclay particles. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45, 1017-1033.
3. Demircan, G. (2024). Structural integrity of glass fiber reinforced nanocomposites under hydrothermal aging for offshore structure applications. *Applied Ocean Research*, 146, 103959.
4. Ovalı, S., & Sancak, E. (2022). Investigating the effect of the aging process on LDPE composites with UV protective additives. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 35(11), 1921-1939.
5. Celebi, M., Altun, M., & Ovalı, S. (2022). The effect of UV additives on thermo-oxidative and color stability of pistachio shell reinforced polypropylene composites. *Polymers and Polymer Composites*, 30, 09673911221081700.
6. Sahu, A.K., Sudhakar, K. & Sarviya, R.M. (2020). UV light effect on the mechanical behaviour of HDPE/Carbon black composites. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 788(1), 012054. IOP Publishing.
7. Dulebova, L. & Garbacz, T. (2017). The effect of particulate fillers on hardness of polymer composite. *Advances in Science and Technology. Research Journal*, 11(3), 66-71.
8. Akaluzia, R.O., Edoziuno, F.O., Adediran, A.A., Odoni, B.U., Edibo, S. & Olayanju, T.M.A. (2021). Evaluation of the effect of reinforcement particle sizes on the impact and hardness properties of hardwood charcoal particulate-polyester resin composites. *Materials Today: Proceedings*, 38, 570-577.
9. Raja, R.S., Manisekar, K. & Manikandan, V. (2013). Effect of fly ash filler size on mechanical properties of polymer matrix composites. *International Journal of Mining, Metallurgy and Mechanical Engineering*, 1, 2320-4060.
10. Wachter, I., Štefko, T., Rantuch, P., Martinka, J. & Pastierová, A. (2021). Effect of UV radiation on optical properties and hardness of transparent wood. *Polymers*, 13(13), 2067.
11. Girimurugan, R., Pugazhenthii, R., Maheskumar, P., Suresh, T. & Vairavel, M. (2021). Impact and hardness behaviour of epoxy resin matrix composites reinforced with banana fiber/camellia sinensis particles. *Materials Today: Proceedings*, 39, 373-377.
12. Ramli, J., Jeefferie, A.R. & Mahat, M.M. (2011). Effects of UV curing exposure time to the mechanical and physical properties of the epoxy and vinyl ester fiber glass laminates composites. *ARPN J. Eng. Appl. Sci*, 6, 104-109.
13. Shi, Z., Zou, C., Zhou, F. & Zhao, J. (2022). Analysis of the mechanical properties and damage mechanism of carbon fiber/epoxy composites under UV aging. *Materials*, 15(8), 2919.
14. Dulebova, L. & Garbacz, T. (2017). The effect of particulate fillers on hardness of polymer composite. *Advances in Science and Technology. Research Journal*, 11(3), 66-71.
15. Sahu, A.K., Sudhakar, K. & Sarviya, R.M. (2020). UV light effect on the mechanical behaviour of HDPE/Carbon black composites. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 788(1), 012054. IOP Publishing.
16. Oğuz, Z.A. (2024). Measurement of Charpy impact durability of intraply hybrid composites under ultraviolet light and nanoparticle reinforcement. *Journal of Materials and Mechatronics: A*, 5(2), 316-326.
17. ASTM G154 Standard Practice for Operating Fluorescent Light Apparatus for UV Exposure of Nonmetallic Materials.
18. Suryawan, I.G.P.A., Suardana, N.P.G., Winaya, I.S. & Suyasa, I. (2020). Hardness analysis of epoxy composite reinforced with glass fiber compared to nettle fibers. *Int. J. Eng. Emerg. Technol*, 5(1), 2020.
19. Raajeshkrishna, C.R. & Chandramohan, P. (2020). Effect of reinforcements and processing method on mechanical properties of glass and basalt epoxy composites. *SN Applied Sciences*, 2(5), 959.

20. Oğuz, Z.A. (2024). UV aging effect on buckling properties of nanoclay particulated intraply hybrid composites. *Physica Scripta*, 100(2), 025916.
21. Özbek, Ö. (2021). Axial and lateral buckling analysis of kevlar/epoxy fiber-reinforced composite laminates incorporating silica nanoparticles. *Polymer Composites*, 42(3), 1109-1122.

Numerical Investigation of Compressive Strength of Structural Steel Material Under Different Loads According to ASTM D695 Standard

Muhammed Safa KAMER^{1,a}

¹Kahramanmaraş Sutcu Imam University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Mechanical Engineering, Kahramanmaraş, Türkiye

^aORCID: 0000-0003-3852-1031

Article Info

Received : 01.01.2025

Accepted : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1666074

Corresponding Author

Muhammed Safa KAMER
msafakamer@ksu.edu.tr

Keywords

Ansys

ASTM D695

Compressive strength test

Explicit dynamics

Numerical analysis

How to cite: KAMER, M.S., (2025). Numerical Investigation of Compressive Strength of Structural Steel Material Under Different Loads According to ASTM D695 Standard. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(1), 227-237.

ABSTRACT

In order to determine the mechanical properties of materials according to certain standards, numerical analysis methods are frequently used in addition to experimental studies. In this study, the compressive strength test was numerically modeled in a computer environment according to the ASTM D695-15 standard. Analyses were carried out by defining structural steel material for the plate designed with the specified standard dimensions and 1 mm thickness. In the numerical analysis, two different loading types, force and displacement, were examined. Numerical analyzes were carried out in a total of twelve different situations by applying 2, 4, 6, 8, 10 and 12 N compressive forces in the analyzes where force load (FL) was applied, and 1, 2, 3, 4, 5 and 6 mm compressive displacements in the analyzes where displacement load (DL) was applied. The effects of different loading types and different loading intensities on the compressive strength of the test specimen were investigated. In all analyses where FL and DL were defined, it was determined that as the FL and DL intensity increased, the stresses and total deformation on the test specimen also increased.

Yapısal Çelik Malzemenin Farklı Yükler Altındaki Basınç Dayanımının ASTM D695 Standardına Göre Sayısal Olarak İncelenmesi

Makale Bilgileri

Geliş : 01.01.2025

Kabul : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1666074

Sorumlu Yazar

Nisa NACAR ÇIKAN
ncikan@cu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Ansys

ASTM D695

Basınç dayanımı testi

Explicit dynamics

Sayısal analiz

Atf şekli: KAMER, M.S., (2025). Yapısal Çelik Malzemenin Farklı Yükler Altındaki Basınç Dayanımının ASTM D695 Standardına Göre Sayısal Olarak İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(1), 227-237.

ÖZ

Malzemelerin belirli standartlara göre mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla deneysel çalışmaların yanında sayısal analiz yöntemleri de sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada, basınç dayanımı testi ASTM D695-15 standardına göre bilgisayar ortamında sayısal olarak modellenmiştir. Belirtilen standart ölçülerinde ve 1 mm kalınlığında tasarlanan levhaya yapısal çelik malzeme tanımlanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizlerde kuvvet ve deplasman olmak üzere iki farklı yükleme tipi incelenmiştir. Kuvvet yükü (FL) uygulanan analizlerde 2, 4, 6, 8, 10 ve 12 N basma kuvvetlerinin, deplasman yükü (DL) uygulanan analizlerde ise 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 mm basma deplasmanlarının uygulanmasıyla toplam oniki farklı durumda sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Farklı yükleme tipi ve farklı yükleme şiddetlerinin test numunesinin basınç dayanımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. FL ve DL tanımlanan tüm analizlerde FL ve DL şiddetinin artmasıyla, test numunesi üzerindeki gerilmelerin ve toplam deformasyonun da arttığı belirlenmiştir.

1. INTRODUCTION

In recent years, software that works with the finite element method is frequently used to evaluate the mechanical properties of materials and determine the behavior of machine components under various loads. One of the most commonly used software for determining the mechanical behavior of materials through the finite element method is Ansys. The Ansys software contains many modules, and some of the modules used for determining mechanical behaviors include Composite PrePost, Explicit Dynamics, and Static Structural. By using these modules, numerical analyses can be conducted by defining the loads acting on machine components, or by modeling the relevant test standards to determine the mechanical behaviors of materials through numerical analysis. The literature contains many standards for determining the mechanical properties of materials, one of which is the ASTM D695 compression strength test standard. This standard involves testing specimens with specific cross-sectional profiles (circular section, square section) to determine the compression strength of materials, as well as testing plates of the specified dimensions (Figure 2) using the relevant test equipment (Figure 1). Numerous studies have been conducted in the literature using both of these methods separately for compression strength testing.

In the literature, many studies have been conducted using test specimens with specific cross-sectional profiles for compression strength testing, some of which are provided here. Dwivedi et al. [1] investigated the parameters affecting the mechanical properties of 3D printed PLA+ diamond lattice structures. They tested the effects of various factors on compressive strength and energy absorption. Additionally, by using nature-inspired machine learning algorithms, they improved the accuracy of model predictions. As a result, they identified cell size as an important factor for compressive strength. Vidakis et al. [2] investigated the effects of seven control parameters on the energy consumption and mechanical properties of PLA samples produced with a 3D printer. In the experiments, they tested parameters such as energy consumption, production time, and compressive strength. They found that printing speed and layer thickness are the most significant factors affecting energy consumption, while infill density and orientation angle have an impact on compressive strength. Claudio et al. [3] investigated the behavior of PLA material under compression. They experimentally determined the effects of printing parameters on the compressive behavior of PLA samples. They found that compressive strength is directly proportional to density, while no such relationship was found for fatigue. Johri et al. [4] performed finite element modeling of natural fiber-reinforced polymeric hybrid composites. They modeled jute fabric using Texgen and calculated the elastic constants. They found that the mechanical properties they calculated showed a low deviation when compared to experimental data. As a result, they concluded that chicken feather fiber reduces density, while jute fiber enhances mechanical durability. Pernet et al. [5] examined the mechanical behavior and the economic and environmental benefits of different infill patterns. Through compressive tests using 14 different infill patterns, they analyzed the relationships between load and weight. In their study, they provided comprehensive information on mechanical properties for product design and manufacturing. Additionally, the study identified opportunities for more robust infill pattern designs for additive manufacturing. Selvamani et al. [6] investigated the bending and compressive properties of rice-reinforced PLA composites. They conducted bending and compression tests according to ASTM standards and analyzed the effects of different infill patterns and compositions using response surface methodology. As a result, they found that a 15 wt% rice content provided better properties, while a 70 wt% rice content created lower interlayer adhesion energy. Additionally, they identified concentric and grid patterns as the best printing patterns for bending and compression properties. Subramaniyan et al. [7] investigated the use of PLA and its composites for producing sandwich structures. They focused on the environmental friendliness of PLA and its performance. They explored the compressive properties of 3D printed sandwich structures and methods to improve the mechanical properties. Srinivasan et al. [8] studied the effects of hygrothermal aging on the performance of glass fiber reinforced IPN composites. They aged samples containing polyurethane and vinyl ester by exposing them to water at different temperatures. The tests showed that temperature and aging time slightly reduced the strength of the GFRP tubes. Additionally, they found that as the proportion of PU prepolymer increased, the geometric structure of the samples was maintained. Morales et al. [9] investigated the effect of interlayer waiting times on the mechanical properties of ABS structures produced by 3D printing. They found that increasing the waiting time between layers led to a reduction in both compressive and shear strength. The study concluded that greater care should be taken when selecting print settings, as printing processes requiring additional time could negatively affect the mechanical strength. Vidakis et al. [10] examined the compressive strength of ABS and ABS plus parts produced with different manufacturing parameters. They experimentally revealed the durability differences

between ABS and ABS plus. They found that ABS parts produced with a larger layer thickness showed lower compressive strength, while ABS plus parts exhibited higher durability.

In the literature, many studies have been conducted where plates of the dimensions specified in the relevant standard are tested using the appropriate testing apparatus for compressive strength tests, and some of these studies are presented here. Cocchi et al. [11] used flat hourglass-shaped specimens to evaluate the compressive behavior of FRP. The hourglass shape reduces stress concentration by ensuring damage occurs at the center. They assessed the specimens using four-point bending and ASTM D695 compression tests on E-glass/epoxy and carbon/PEEK composite materials. Haseebuddin et al. [12] examined the mechanical properties of polyester composites reinforced with different percentages of PET flakes. They found that as the PET flake percentage increased up to 15%, the hardness increased, the composite with 10 % PET flakes exhibited the maximum tensile strength, and the composite with 5 % PET flakes showed the maximum compressive strength. They studied the fracture morphology using scanning electron microscopy. As a result, they demonstrated that the PET flake percentages had a significant impact on the mechanical properties. Squires et al. [13] investigated the compressive strength of unidirectional carbon fiber by examining preparation and configuration variables. They measured compressive strength using the ASTM D 695 M test method and conducted damage evaluations using SEM microscopy. The results showed that the quality of specimen preparation was a significant factor influencing the damage mechanism. They demonstrated that the preparation quality directly affected the compressive strength.

In this study, the compressive strength test was numerically modeled in a computer environment according to the ASTM D695-15 standard. Numerical analyses were carried out in the “Explicit Dynamics” module of the Ansys Workbench R19.2 program. Structural steel material was defined for the plate designed with standard dimensions (Figure 2) and 1 mm thickness, and the analyses were performed. Two different loading types, force and displacement, were examined in the numerical analyses. In the FL applied analyses, six different compressive forces (2 N, 4 N, 6 N, 8 N, 10 N, and 12 N) and in the DL applied analyses, six different compressive displacements (1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, and 6 mm) were applied, resulting in a total of twelve different cases for the numerical analyses. The effects of different loading types and loading intensities on the compressive strength of the test specimens were investigated. As it is known, ASTM D695-15 standard is defined for rigid plastic materials. In this study, instead of plastic material, Structural steel material was selected from the Ansys Workbench R19.2 program “Explicit Materials” library, which can be easily found in the market, to perform the test when necessary. The aim of this study is to determine the necessary parameters for the numerical analysis of the compression test in the Ansys Workbench R19.2 program in accordance with the ASTM D695-15 standard. Our next study will be to supply the necessary apparatus and perform the tests for the application of the ASTM D695-15 standard in the compression test device. In this way, the verification of the experimental and numerical studies can be done. Afterwards, it is planned to perform the tests and numerical analyzes of plastic and composite materials according to the ASTM D695-15 standard using the obtained data and determined parameters.

2. MATERIALS AND METHOD

The ASTM D695-15 [14] compressive strength test rig generally consists of support jigs, the test specimen, and the heads of the compressive test machine (Figure 1).

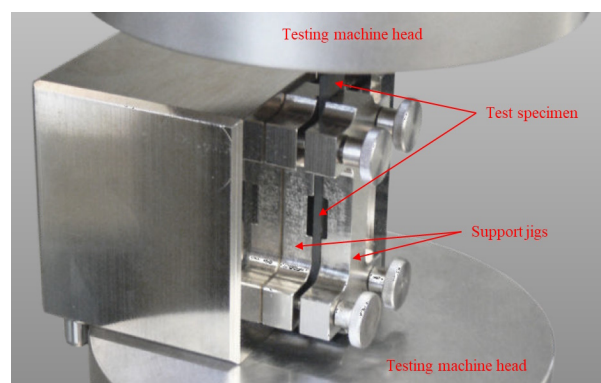


Figure 1. ASTM D695 compressive strength test rig [15]

In order to perform numerical analyses, firstly, the solid model designs of the schematic support jig created using the surfaces of the test specimen and support jigs in contact with the test specimen were performed in the SolidWorks 2018 program (Figure 2). Assembly designs consisting of the test specimen and schematic support jigs were made. Only the parts of the support jigs shown in Figure 1 that are in contact with the test specimen were designed to be used in analyses, and each surface of these elements was given a thickness of 0.4 mm. As seen in Figure 2, at the beginning of the test, there was a test distance of 6.4 mm between the upper surface of the test specimen and the upper surface of the schematic support jig.

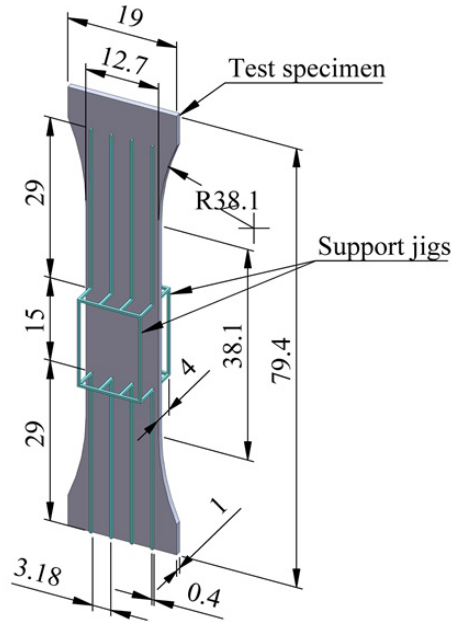


Figure 2. Solid model used in numerical analysis

The designed solid model (Figure 2) was transferred to the “Explicit Dynamics” module in the Ansys Workbench R19.2 program. Structural steel material definition was made for all elements in the analysis design. The structural steel material properties used in the analysis were given in Table 1. Afterwards, frictionless contact relations were defined between the front and back surfaces of the test specimen and the relevant surfaces where the support jigs was in contact. In this way, the test specimen was able to move between the support jigs when necessary under the effect of the compression load.

Table 1. Structural steel material properties

Density	7.85 g/cm ³
Young's modulus	200 GPa
Tensile yield strength	250 MPa
Tensile ultimate strength	460 MPa

The mesh properties used in the numerical analyses were given in Table 1. The mesh image of the test specimen and support jigs created using the properties specified in Table 1 was shown in Figure 3 together with the detailed image.

Table 2. Mesh properties

Body sizing - Element size - Test specimen	1 mm
Body sizing - Element size - Support jigs	0.4 mm
Hex dominant method - Support jigs	All quad
Max. Skewness	0.25244
Min. Orthogonal Quality	0.925
Number of nodes	9664
Number of elements	3153

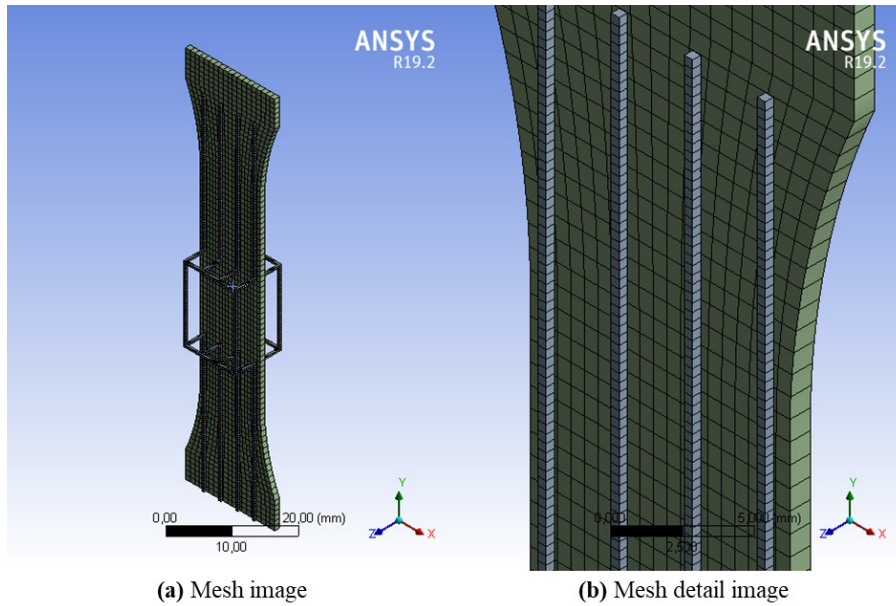


Figure 3. Mesh images

In the numerical analysis, all surfaces of the schematic support jigs and the bottom surface of the test specimen were selected and the fixed support boundary condition was defined (Figure 4). In the numerical analyses applied to FL, force and displacement boundary conditions were defined on the upper surface of the test specimen (Figure 4a). In the displacement boundary condition, the upper surface of the test specimen was fixed (0 mm) in the X and Z axes and left free in the Y axis. In the force boundary condition, no force (0 N) was defined on the upper surface of the test specimen in the X and Z axes, and six different numerical analysis were performed by applying compressive forces of 2 N, 4 N, 6 N, 8 N, 10 N and 12 N in the negative direction in the Y axis. In the numerical analyses applied to DL, a displacement boundary condition was defined on the upper surface of the test specimen (Figure 4b). In the displacement boundary condition, the upper surface of the test specimen was fixed (0 mm) in the X and Z axes, and six different numerical analysis were performed by applying compressive displacements of 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm and 6 mm in the negative direction in the Y axis. All numerical analyses were performed using a end time of 0.02 s. As a result of numerical analysis, the stress and deformation behaviors of the test specimen under compressive loads at different forces and different displacements were investigated.

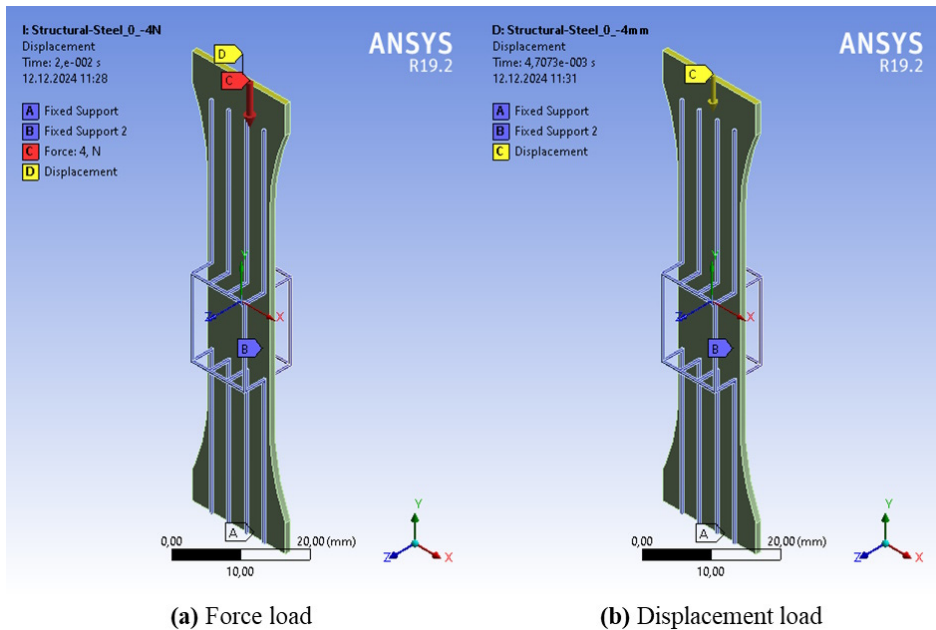


Figure 4. Boundary conditions images used in numerical analysis

3. RESULTS AND DISCUSSION

Equivalent Von Mises stress contour images obtained from numerical analyses performed under different compressive forces by defining FL were shown in Figure 5. When the figure was examined, it was seen that the stresses on the test specimen increase as the applied force increases. It was determined that the test specimen did not suffer buckling damage in the analyses performed with 2 N and 4 N compression forces, some buckling occurred in the analyses performed with 8 N and 10 N compression forces, and the test specimen was completely deformed in the analyses performed with 12 N compression force. In the analyses where buckling occurs, it was seen that the buckling occurs in the middle region of the test specimen. There is some opening in the middle regions of the support jigs used in the compressive strength test, and the test mechanism ensures that buckling occurs in this region.

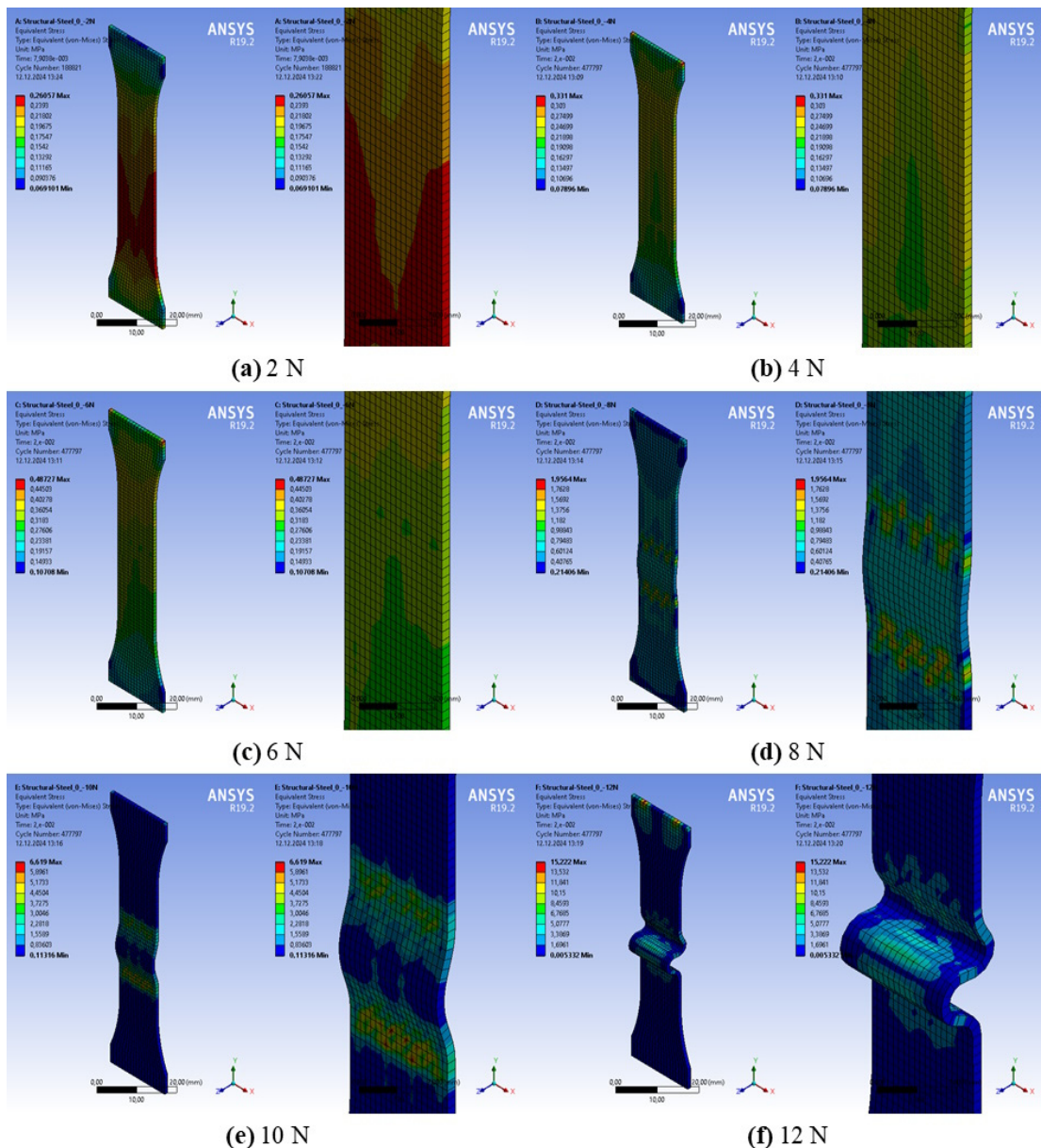


Figure 5. Equivalent stress images obtained from numerical analysis where force load is defined

Total deformation contour images obtained from numerical analyses performed under different compression forces by defining FL were shown in Figure 6. When the figure was examined, it was seen that the total deformation on the test specimen increases with the increase in the applied force. In the

analysis performed with 4 N compression force, it was observed that some compression deformation begins in the middle region of the test specimen, in the analysis performed with 6 N compression force, the compression deformation in the middle region spreads to the entire section, and in the analysis performed with 8 N compression force, buckling begins in the middle region. In the analyses performed with 8 N and 10 N compressive forces, it was determined that the highest total deformation occurred in the middle regions of the test specimen, and in the analyses performed with 12 N compressive force, the highest total deformation occurred in the upper part of the test specimen. In fact, it is not expected that a force of 12 N would cause such a deformation in the structural steel material in the specified cross-sectional area. It can be said that this deformation damage occurred due to reasons such as the low thickness of the compression test specimen, the material being forced to buckle rather than to compress due to the gap in the middle area of the test apparatus, and the formation of a high-speed impact effect in the analysis as a result of the analysis time of 0.02 s determined in the boundary conditions of the maximum deformation occurring in the analysis.

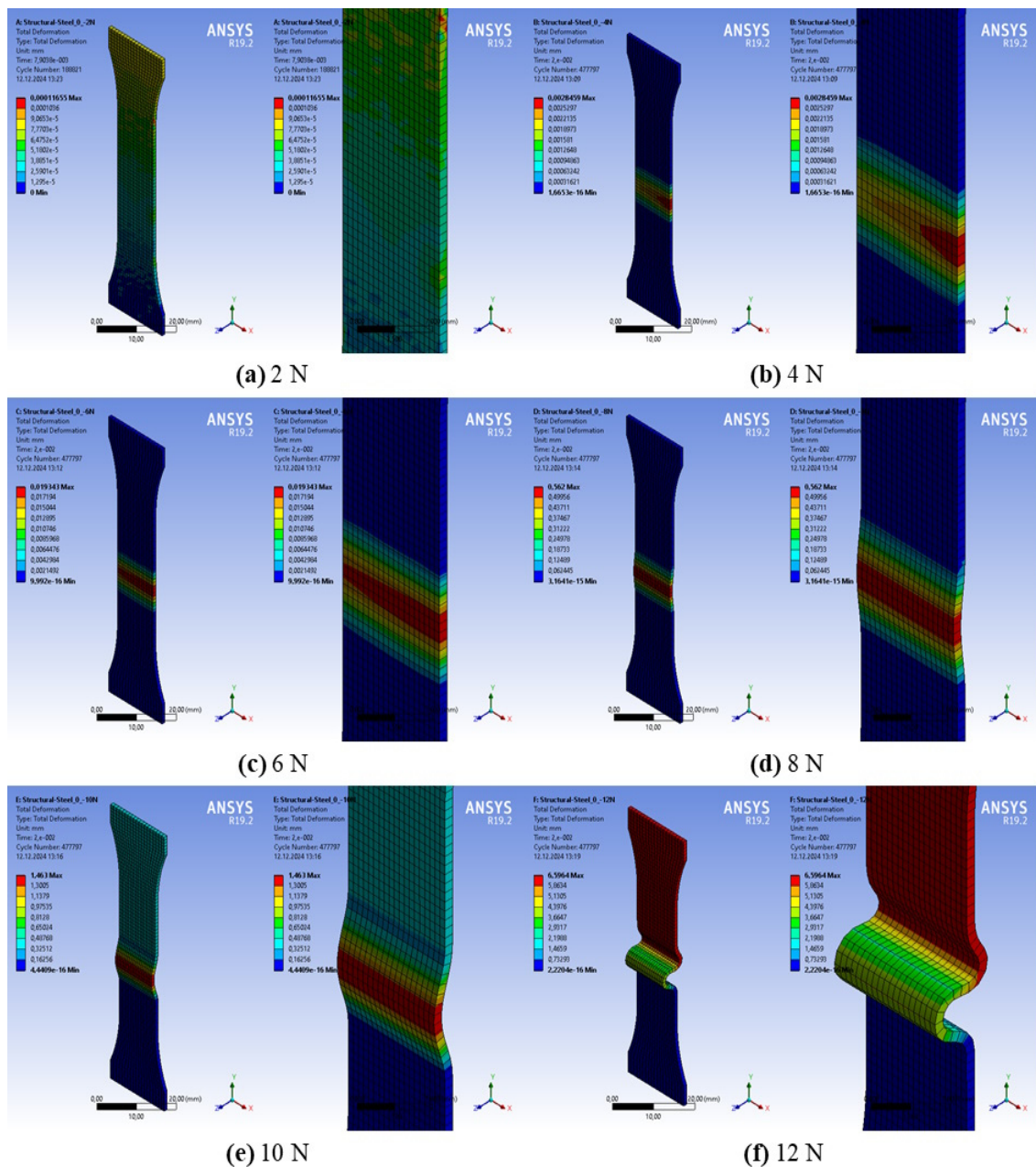


Figure 6. Total deformation images obtained from numerical analysis where force load is defined

Equivalent Von Mises stress contour images obtained from numerical analyses performed under different compressive displacements by defining DL were shown in Figure 7. When the figure was examined, it was seen that the stresses on the test specimen increase with the increase in the applied displacement. It was determined that buckling damage occurred in all of the different compression displacements applied, that the amount of buckling increased as the amount of displacement increased, and that the buckling occurred in the middle regions of the test specimen.

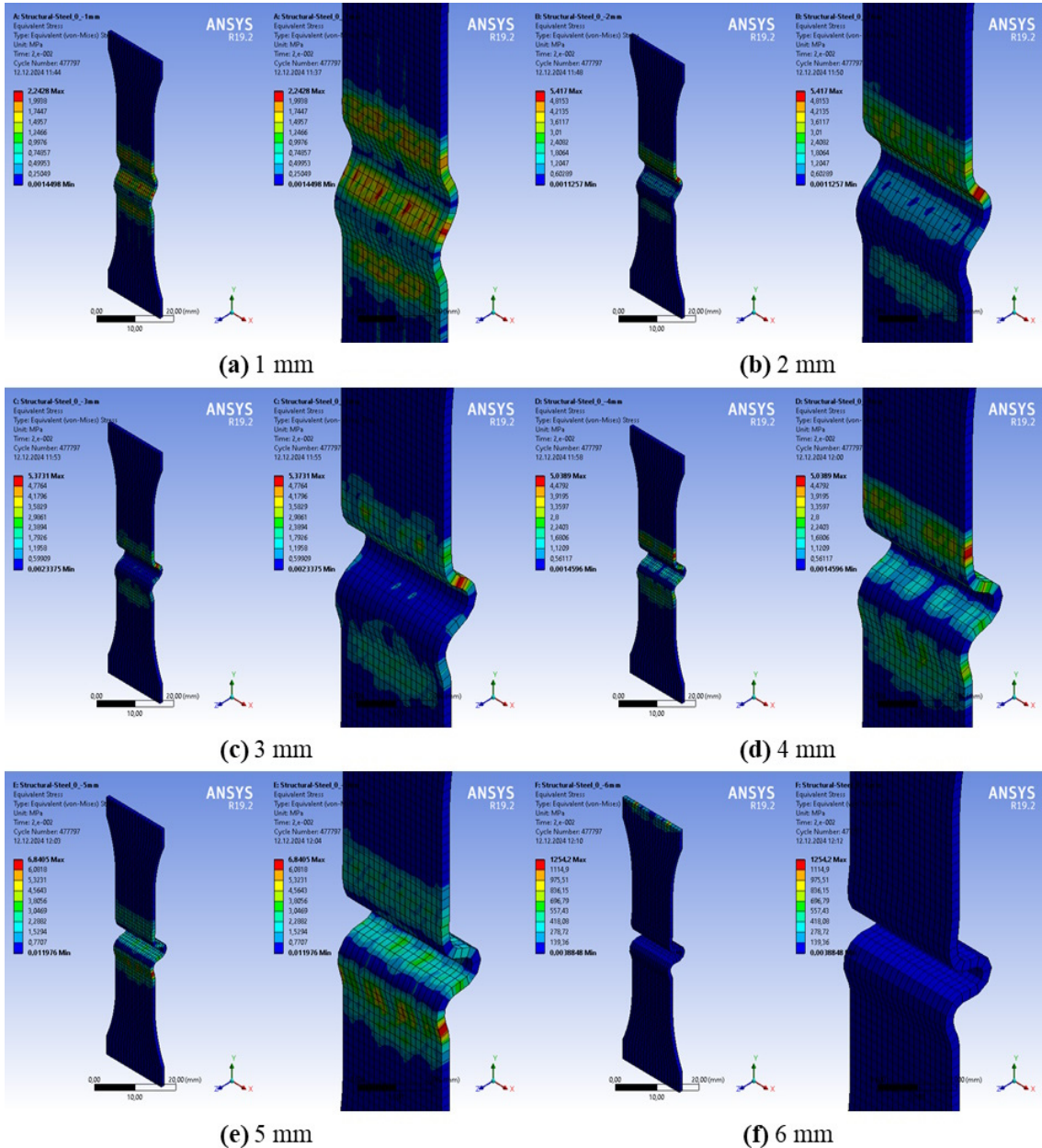


Figure 7. Equivalent stress images obtained from numerical analysis where displacement load is defined

Total deformation contour images obtained from the numerical analyses performed under different compression displacements by defining DL were shown in Figure 8. When the figure was examined, it was seen that the total deformation on the test specimen increases with the increase in the applied displacement. In the analyses performed with 1 mm, 2 mm and 3 mm compression displacements, it was determined that the highest total deformation occurred in the middle regions of the test specimen, and in the analyses performed with 4 mm, 5 mm and 6 mm compression displacements, it was determined that the highest total deformation occurred in the upper part of the test specimen.

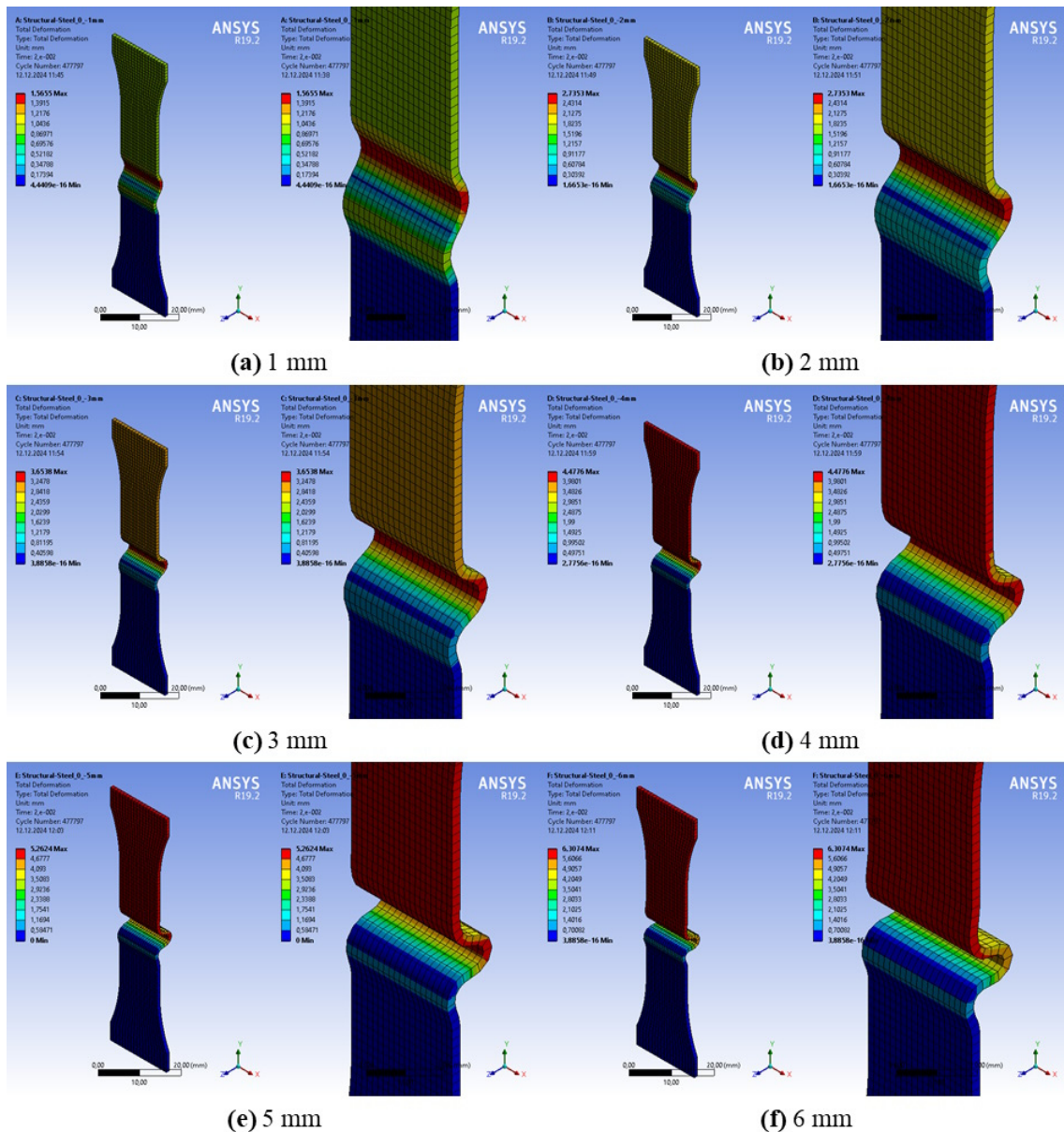


Figure 8. Total deformation images obtained from numerical analysis where displacement load is defined

The result graphs obtained from the numerical analysis performed by defining FL and DL were shown in Figure 9. When the maximum equivalent stress (MES) – time graph obtained from the numerical analysis performed by defining FL was examined (Figure 9a), it was determined that the MES values of the test specimens increased with the increase in the applied compressive force, and that the test specimens exhibited creep behavior at this value for a while after reaching certain MES values. It was observed that in the analyses performed with 2 N, 4 N and 6 N compressive forces, the analyses were terminated after the test specimen has crept to some extent, and in the analyses performed with 8 N, 10 N and 12 N compressive forces, the analyses were terminated with the rapid increase in the MES values after the test specimen has crept to some extent. When the maximum total deformation (MTD) – time graph obtained from the numerical analysis performed by defining FL was examined (Figure 9b), it was determined that the MTD values of the test specimens increased with the increase in the applied compression force. In the analyses performed with all compression forces, it was observed that the increase in the MTD values of the test specimens initially remained low for a while, and then the increase in the MTD values gradually reached higher values. When the MES – time graph obtained from the numerical analysis performed by defining DL was examined (Figure 9c), it was seen that the MES values of the test specimens increase with the increase in the applied compression displacement, yielding occurs after the test specimens reach certain

MES values, and the test specimens undergo plastic deformation after this region. When the MTD – time graph obtained from the numerical analysis performed by defining DL was examined (Figure 9d), it was determined that the MTD values of the test specimens increased with the increase in the applied compressive displacement. It can be said that in the analyses performed with all compression displacements, the MTD values of the test specimens increased with a somewhat linear behavior depending on time.

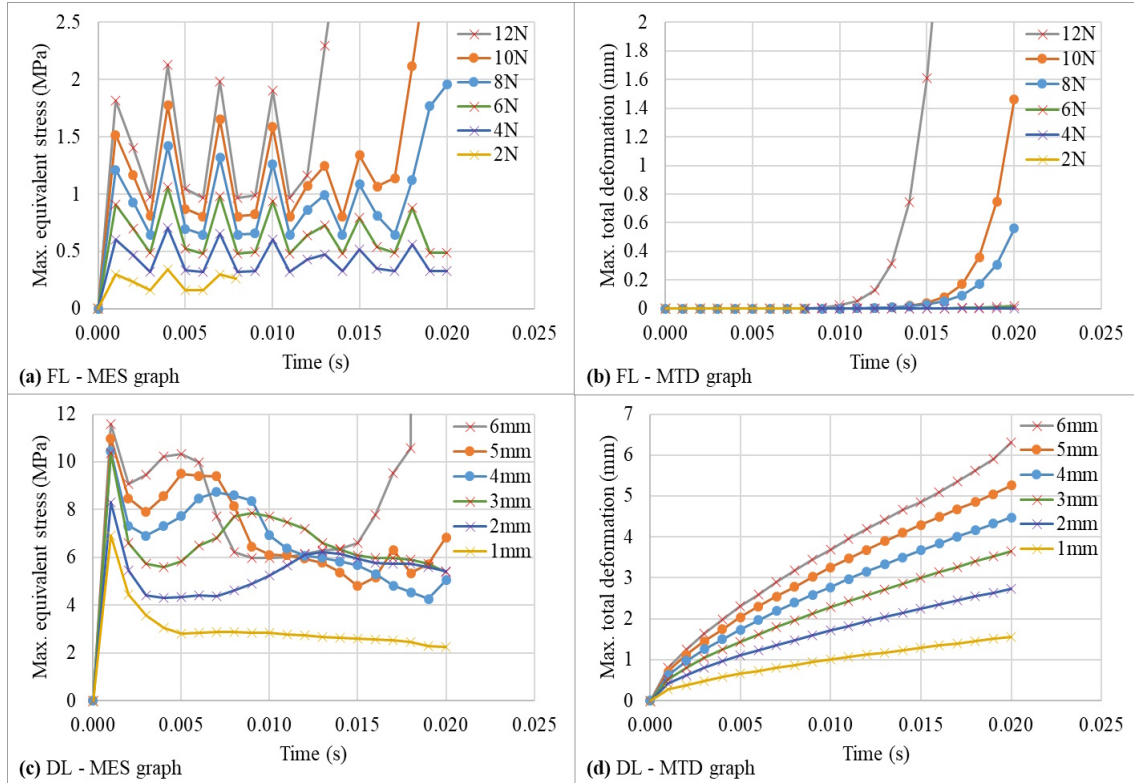


Figure 9. Results graphs obtained from numerical analysis

4. CONCLUSION

In this study, the compressive strength test was numerically modeled in a computer environment according to the ASTM D695-15 standard. The effects of different force (2 N, 4 N, 6 N, 8 N, 10 N, 12 N) and different displacement (1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm) loads applied in numerical analysis were investigated on the compressive strength of the test specimen. The results obtained from the study were listed below.

In the numerical analyses performed under different compression forces by defining FL, it was determined that;

- as the applied force increases, the stresses and total deformation on the test specimen also increase,
- in the analyses performed with 2 N, 4 N and 6 N compression forces, the test specimen did not suffer buckling damage,
- in the analyses performed with 8 N and 10 N compression forces, some buckling occurred,
- in the analysis performed with 12 N compression force, the test specimen was completely deformed,
- in the analysis performed with 4 N compression force, some compression deformation started in the middle region of the test specimen,
- in the analysis performed with 6 N compressive force, the compressive deformation in the middle region spread to the entire section,
- in the analysis performed with 8 N compression force, buckling started in the middle region,
- in the analyses performed with 8 N and 10 N compression forces, the highest total deformation occurred in the middle regions of the test specimen,
- in the analysis performed with 12 N compression force, the highest total deformation occurred in the upper part of the test specimen.

In the numerical analyses performed under different compression displacements by defining DL, it was determined that;

- as the applied displacement increases, the stresses and total deformation on the test specimen also increase,
- buckling damage occurred at all applied different compression displacements,
- as the amount of displacement increases, the amount of buckling also increases,
- in the analyses performed with 1 mm, 2 mm and 3 mm compression displacements, the highest total deformation occurred in the middle regions of the test specimen, in the analyses performed with 4 mm, 5 mm and 6 mm compression displacements, the highest total deformation occurred in the upper part of the test specimen.

5. REFERENCES

1. Dwivedi, K., Joshi, S., Nair, R., Sapre, M.S. & Jatti, V. (2024). Optimizing 3D printed diamond lattice structure and investigating the influence of process parameters on their mechanical integrity using nature-inspired machine learning algorithms. *Materials Today Communications*, 38(108233), 1-15.
2. Vidakis, N., Petousis, M., Karapidakis, E., Mountakis, N., David, C. & Sagris, D. (2023). Energy consumption versus strength in MEX 3D printing of polylactic acid. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 6(100119), 1-19.
3. Cláudio, R.A., Dupont, J., Baptista, R., Leite, M. & Reis, L. (2022). Behaviour evaluation of 3D printed polylactic acid under compression. *Journal of Materials Research and Technology*, 21, 4052-4066.
4. Johri, N., Agarwal, G., Mishra, R.K. & Thakur, H.C. (2022). FEM analysis of polymeric hybrid composites. *Materials Today: Proceedings*, 57, 383-390.
5. Pernet, B., Nagel, J.K. & Zhang, H. (2022). Compressive strength assessment of 3D printing infill patterns. *Procedia CIRP*, 105, 682-687.
6. Selvamani, S.K., Ngui, W.K., Rajan, K., Samykan, M., Kumar R.R. & Badadhe, A.M. (2022). Investigation of bending and compression properties on PLA-brass composite using FDM. *Physics and Chemistry of the Earth*, 128(103251), 1-8.
7. Subramaniyan, M., Karuppan, S.P.P., Anand A.P. & Vasanthan A.P. (2022). Survey on compression property of sandwich 3D printed PLA components. *Materials Today: Proceedings*, 66, 955-961.
8. Srinivasan, T., Suresh, G., Ramu, P., Vignesh, R., Harshan, A.V. & Vignesh, K.P. (2021). Effect of hygrothermal ageing on the compressive behavior of glass fiber reinforced IPN composite pipes. *Materials Today: Proceedings*, 45, 1354-1359.
9. Morales, N.G., Fleck, T.J. & Rhoads, J.F. (2018). The effect of interlayer cooling on the mechanical properties of components printed via fused deposition. *Additive Manufacturing*, 24, 243-248.
10. Vidakis, N., Petousis, M., Vairis, A., Savvakis, K. & Maniadi, A. (2017). On the compressive behavior of an FDM Steward Platform part. *Journal of Computational Design and Engineering*, 4(4), 339-346.
11. Cocchi, A., Montagnier, O. & Hochard, C. (2021). Study of hourglass-shaped specimens for the analysis of compression behaviour in fibre direction of FRP composites using compression and four-point bending tests. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 144(106332), 1-12.
12. Haseebuddin, M.R., Santhosh, S. & Shandilya, A.B. (2021). Development and characterization of PET flakes reinforced polyester resin composites. *Materials Today: Proceedings*, 46, 6075-6082.
13. Squires, C.A., Netting, K.H. & Chambers, A.R. (2007). Understanding the factors affecting the compressive testing of unidirectional carbon fibre composites. *Composites Part B: Engineering*, 38(4), 481-487.
14. ASTM D695 – 15, (2015). Standard test method for compressive properties of rigid plastics. *ASTM International*, <https://doi.org/10.1520/D0695-15>. Date of access: 31.03.2022.
15. Product Information Compression test kits (end-loading), (2024). *Zwick Roell*, https://www.zwickroell.com/fileadmin/content/Files/SharePoint/user_upload/PI_EN/10_807_Compression_test_kits_end_loading_PI_EN.pdf. Date of access: 17.10.2024.



Sustainable Energy and Turkey: The Role of Geothermal Energy and Energy Planning

Manolya GÜLDÜREK^{1,a}

¹Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Department of Technology Transfer Office, Adana, Türkiye

^aORCID: 0000-0002-6906-6986

Article Info

Received : 04.02.2025

Accepted : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1666078

Corresponding Author

Manolya GÜLDÜREK

mguldurek@atu.edu.tr

Keywords

Geothermal energy

Sustainable energy

Energy planning

Capacity increase

Renewable energy

How to cite: GÜLDÜREK, M., (2025). Sustainable Energy and Turkey: The Role of Geothermal Energy and Energy Planning. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(1), 239-249.

ABSTRACT

This article examines Turkey's geothermal energy potential, current status, and future role, highlighting its vast reserves, particularly in the Aegean Region. Using data from 2018 to 2023, it analyzes the growth of installed capacity and forecasts an annual increase of approximately 100 MW, reaching around 2,500 MW by 2030. Recent advancements in geothermal technologies, especially in energy storage and efficiency, are expected to further enhance Turkey's capacity. The significance of geothermal energy in Turkey's energy planning goes beyond electricity generation, supporting regional heating and greenhouse farming while strengthening energy security and advancing renewable energy targets. The article highlights geothermal energy's role in sustainability, reducing carbon emissions, and supporting local development. In conclusion, the article stresses the need for Turkey to boost geothermal investment, adopt innovative technologies, and implement sustainable strategies. It highlights geothermal energy as a key resource in strengthening Turkey's energy security and achieving sustainable development goals.

Sürdürülebilir Enerji ve Türkiye: Jeotermal Enerji ve Enerji Planlamasının Rolü

Makale Bilgileri

Geliş : 04.02.2025

Kabul : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1666078

Sorumlu Yazar

Manolya GÜLDÜREK

mguldurek@atu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Jeotermal enerji

Sürdürülebilir enerji

Enerji planlaması

Kapasite artışı

Yenilenebilir enerji

Atf şekli: GÜLDÜREK, M., (2025). Sürdürülebilir Enerji ve Türkiye: Jeotermal Enerji ve Enerji Planlamasının Rolü. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(1), 239-249.

ÖZ

Bu makale, Türkiye'nin jeotermal enerji potansiyelini, mevcut durumunu ve gelecekteki rolünü inceleyerek özellikle Ege Bölgesi'ndeki zengin rezervlerine vurgu yapmaktadır. 2018-2023 verilerini kullanarak kurulu kapasitedeki artışı analiz etmekte ve yıllık yaklaşık 100 MW'lık bir artışla 2030 yılına kadar toplamda 2.500 MW'a ulaşacağını öngörmektedir. Özellikle enerji depolama ve verimlilik alanındaki yeni jeotermal teknolojiler, Türkiye'nin kapasitesini daha da artırması beklenmektedir. Türkiye'nin enerji planlamasında jeotermal enerjinin önemi, yalnızca elektrik üretiminin ötesine geçerek bölgesel ısıtma ve sera tarımına katkıda bulunurken, enerji güvenliğini güçlendirmekte ve yenilenebilir enerji hedeflerine ilerlemeyi desteklemektedir. Makale, jeotermal enerjinin sürdürülebilirlikteki rolünü vurgulayarak karbon emisyonlarını azaltma ve yerel kalkınmayı destekleme etkilerine değinmektedir. Sonuç olarak, Türkiye'nin jeotermal yatırımlarını artırması, yenilikçi teknolojileri benimsemesi ve sürdürülebilir stratejiler uygulaması gerektiği vurgulanmaktadır. Jeotermal enerji, Türkiye'nin enerji güvenliğini güçlendirmede ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada kilit bir kaynak olarak öne çıkmaktadır.

1. INTRODUCTION

Geothermal energy refers to the utilization of heat energy originating from the depths of the Earth's crust. The source of this energy is the water and steam that rise to the surface due to temperature differentials underground. Geothermal energy is a sustainable and environmentally friendly energy source that can be used for direct heating, electricity generation, and industrial processes. This energy source holds significant importance for environmental sustainability due to its renewable nature and ability to minimize carbon emissions [1].

In many countries around the world, geothermal energy is utilized in areas such as electricity generation and local heating. Turkey is rich in geothermal energy potential and is developing various projects to utilize this resource more effectively. Active geothermal fields are particularly concentrated in Turkey's western and southern regions. The Aegean Region, along with provinces such as Nevşehir, Aydın, Manisa, and Denizli, hosts Turkey's leading geothermal energy resources. In these regions, geothermal energy is widely used for both electricity production and greenhouse heating.

Turkey is among the regions worldwide with active geothermal zones and has substantial potential in this field. The current utilization of geothermal energy in Turkey is largely limited to regional heating and electricity generation.

However, when used more effectively, these resources have the capacity to meet a significant portion of Turkey's energy needs [2,3]. The role of geothermal energy in Turkey's energy planning is becoming increasingly important, and its share is expected to grow in the future [4,5].

Beyond electricity production, geothermal energy is effectively utilized in industrial and heating applications. For instance, some geothermal plants in the Aegean Region provide district heating for residential areas and are also used in agricultural activities such as greenhouse heating [6,7]. Additionally, geothermal energy contributes to Turkey's sustainable development goals as an environmentally friendly alternative energy source [8,9].

Although Turkey has made significant progress in the geothermal energy sector, there is a need for technological advancements and increased investments to utilize these resources more efficiently. It is emphasized that geothermal energy should occupy a greater place in energy planning to enable broader utilization [1]. In this context, geothermal energy is anticipated to play an important role in Turkey's future energy portfolio [5,10].

The majority of Turkey's geothermal energy resources are located in the Western Anatolia region, with significant investments made in recent years in the Cappadocia area to enhance geothermal potential. Drilling activities around Hasan Mountain have shown increasing temperature values with depth, and numerical modeling based on these results suggests that the region's geothermal potential is linked to a magma chamber located deeper in the Earth's crust [11].

Geothermal energy in Turkey, particularly in Western and Central Anatolia, is a valuable resource due to its young tectonic and volcanic activity. In 2022, Turkey's geothermal electricity generation capacity reached 1,663 MWe, with total direct heat use at 5,113 MWt. With further research and the development of Enhanced Deep Geothermal Systems (EDGS), Turkey's geothermal capacity is expected to grow significantly, potentially exceeding 100,000 MWt in the medium term [12].

Geothermal energy is a renewable energy source that is highly suitable for Turkey's needs. As primary energy sources are depleting and resources are unevenly distributed globally, local and renewable energy sources are becoming essential for the country. Geothermal energy can contribute to meeting part of Turkey's energy demands, particularly for electricity generation through geothermal power plants [13].

Since 2015, Turkey has made significant advancements in geothermal energy. The country has discovered approximately 460 geothermal fields and reached a geothermal direct-use capacity of 3828.5 MWt for heating, agriculture, and balneological purposes. As of December 2020, Turkey's geothermal electricity production capacity is 1663 MWe, with ongoing deep reservoir explorations and drilling efforts to further enhance electricity production [14].

Turkey is known to have nearly 274 geothermal occurrences, with about 25 fields currently being exploited for direct and indirect energy use. This study evaluates the production data of exploited fields and available data for unexploited fields to estimate the potential of each field in terms of maximum capacity or annual energy use, using geothermal inventory data from MTA and other sources [15].

The Sustainable Development Goals bring together various disciplines such as social, economic, cultural, health, environment, and climate. As the demand for energy increases due to population growth, technological advancements, and rising living standards, the need for clean and sustainable solutions is addressed. In Turkey, significant capacity increases in renewable energy, including solar, wind, biomass, and geothermal, have been achieved, especially with the Renewable Energy Resources Support Mechanism. These developments contribute to energy independence, and Turkey ranks sixth globally and first in Europe in geothermal energy capacity, with diverse geothermal resources across the country used for electricity production, heating, greenhouse farming, and health tourism [16].

This Article includes:

- A comprehensive analysis of Turkey's geothermal energy resources, their current state, potential, and future development trends.
- An evaluation of the role and importance of geothermal energy in Turkey's sustainable energy goals, energy security, and green energy transition.
- Scientific predictions of Turkey's geothermal energy production capacity growth by 2030 (e.g., using linear regression models) and energy strategies based on these forecasts.
- An examination of the potential impacts of investments in the geothermal energy sector on economic growth, local employment, and regional development, as well as opportunities to enhance sector efficiency through innovative technologies.

2. GEOTHERMAL ENERGY IN TURKEY

Turkey's energy planning has been shaped in recent years by a strong focus on sustainable and renewable energy sources. To ensure energy security, reduce dependency on imports, and minimize environmental impacts, Turkey aims to increase the utilization of renewable energy resources. In this context, geothermal energy stands out as a significant alternative energy source due to its potential and environmental advantages [17,18].

The primary objectives of Turkey's energy policies include reducing energy dependency, increasing the use of domestic and renewable resources, and minimizing carbon emissions. As of 2023, Turkey supports geothermal energy through the Renewable Energy Resources Support Mechanism. This mechanism aims to boost geothermal energy investments and increase the share of renewable resources in the country's energy production [19,20].

While Turkey possesses substantial geothermal energy potential globally, its efficient utilization remains limited. As of 2020, Turkey's geothermal energy capacity was approximately 1,600 MW, with a significant portion allocated to electricity generation. Concentrated primarily in the western regions, Turkey's geothermal resources are centered in provinces like Aydın, Denizli, and Manisa in the Aegean region, which host key geothermal power plants [21].

The critical role of geothermal energy in Turkey's energy planning lies in its ability to provide both reliable and continuous energy. Unlike other renewable energy sources, geothermal energy can be produced uninterruptedly, which strengthens Turkey's energy security [5]. Additionally, geothermal energy holds significant potential for local heating and industrial applications, making it an essential resource in meeting the country's energy needs.

The importance of geothermal energy in Turkey's energy policies extends beyond electricity generation. Geothermal energy also contributes to local development through applications such as regional heating systems and agricultural activities. For instance, geothermal energy is widely used in greenhouse heating, and increased investments in this area have enhanced agricultural productivity in Turkey [6].

Turkey's energy targets for 2023 and beyond foresee an increased share of geothermal energy. In alignment with Turkey's National Renewable Energy Action Plan and Green Deal strategies, the role of geothermal energy in the country's energy production is expected to grow. These targets will play a crucial role in helping Turkey achieve its net-zero emission goals [22].

3. GEOTHERMAL ENERGY SYSTEMS

In order to operate geothermal power plants efficiently and sustainably, it is crucial to accurately model geothermal systems. This modeling process ensures the accurate prediction of subsurface temperature profiles, reservoir properties, fluid dynamics, energy production efficiency, and environmental impacts [23]. One of the key parameters determining the efficiency of geothermal reservoirs is the temperature distribution underground. The subsurface temperature profile is a factor that directly impacts the potential energy production capacity, and therefore, it is necessary to create an accurate temperature map [24]. The porosity and permeability characteristics of the reservoir determine the movement of the fluid and the rate at which heat is transferred to the surface. These properties are important parameters for the sustainable use of geothermal energy; high permeability allows the fluid to move more efficiently [25]. Additionally, the size of the reservoir and fluid dynamics are other critical factors to be considered in the modeling process. The movement of the fluid underground, evaporation rate, pressure changes, and the interaction between liquid and steam can directly affect the efficiency of energy production [26].

To ensure the sustainability of geothermal systems, it is also necessary to model the changes in energy production capacity over time and the recharging processes of the reservoir. Monitoring the changes in temperature and pressure during energy production helps predict the depletion rate of the reservoir and recovery times. These models play a critical role in ensuring the long-term efficiency of geothermal plants [27]. Furthermore, environmental impacts and greenhouse gas emissions are also important parts of the modeling process. While geothermal energy is considered an environmentally friendly option due to its low carbon emissions, the impact of the reservoir on the environment, especially on groundwater and ecosystems, must be accurately simulated [28]. Economic parameters should also be considered in the modeling. The installation costs, maintenance requirements, and energy production costs of geothermal plants are essential for energy planning and resource allocation [29]. Finally, to ensure sustainability in geothermal energy production, the process of reinjecting water into the reservoir, known as "re-injection," must be considered in the models. This process can prevent the reservoir from depleting in the long term and ensure the continuity of energy production capacity.

Accurate and efficient planning of geothermal energy systems will be possible by modeling these critical parameters. This modeling process not only increases energy production efficiency but also minimizes environmental impacts, ensuring the long-term sustainability of the energy plants. The basic principles of geothermal energy are shown in Figure 1 below [30].

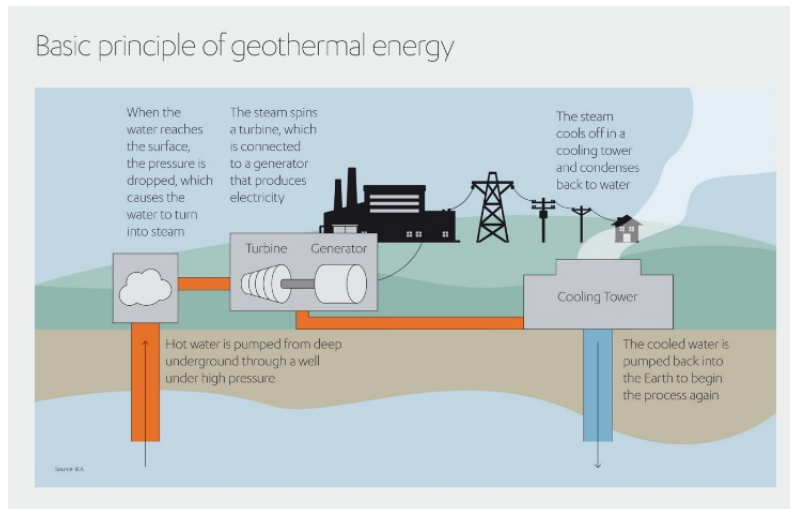


Figure 1. The basic principles of geothermal energy

4. THE ROLE OF GEOTHERMAL ENERGY IN TURKEY'S ENERGY PLANNING STRATEGY

Since the early 2000s, Turkey has taken significant steps towards reducing its dependence on foreign energy sources and increasing the share of renewable energy resources. One of the key components of this strategy is enhancing the potential of renewable energy sources, including geothermal energy.

- **Advantages of Geothermal Energy:** Geothermal energy is a local and continuous energy source for Turkey. Unlike other renewable energy sources (such as solar and wind), which can be variable depending on seasonal and weather conditions, geothermal energy provides nearly uninterrupted production. Additionally, it significantly contributes to environmental sustainability due to its low carbon emissions.
- **Turkey's Geothermal Potential:** Turkey is one of the seven largest countries in the world with geothermal energy reserves, and its geothermal resources, concentrated in the Aegean Region, play a crucial role in the country's energy planning. Large geothermal resources in provinces such as Aydın, Denizli, Manisa, and Nevşehir offer a wide range of uses, from electricity generation to heating and greenhouse farming. This situation provides an important advantage for enhancing Turkey's energy security.

4.1. Current Status and Growth Trends

Currently, Turkey's geothermal energy installed capacity is approximately 1,800 MW as of 2023, and it is expected to increase to 2,500 MW by 2030, with an annual growth rate of around 100 MW. These growth trends highlight Turkey's view of geothermal energy as a critical source for reducing energy dependence. This increase in capacity is expected to account for about 3-4% of the country's energy production.

- **Share in Electricity Generation:** The share of geothermal energy in Turkey's total electricity production is expected to rise to around 3-4%. However, considering its contributions in areas such as district heating and greenhouse farming, the economic impact of geothermal energy on total energy production will be much greater. This demonstrates the need for geothermal energy to play an even larger role in Turkey's energy planning.

4.2. Energy Future and Sustainability

In Turkey's energy planning, the role of geothermal energy is growing in alignment with green energy transformation and sustainable development goals. Geothermal energy significantly contributes to achieving the country's renewable energy targets. Turkey aims to source 30% of its energy production from renewable sources by 2030, and increasing the share of geothermal energy will help Turkey reduce its carbon emissions.

- **Capacity Increase and Innovative Technologies:** Technological advancements, particularly closed-loop systems and deep geothermal energy, are expected to play a significant role in increasing geothermal's share in Turkey's energy planning. These systems provide more efficient energy production and enhance the efficiency of geothermal plants. Additionally, developments in geothermal heating systems will increase geothermal energy's influence, not only in electricity generation but also in energy efficiency and local heating systems.

4.3. Impact of Geothermal Energy on Energy Security and Local Development

Geothermal energy strengthens Turkey's energy security. Especially energy production based on local resources is critical for reducing import dependency. In regions with significant geothermal potential, local access to energy will increase, contributing to local development.

- **Energy Independence:** By increasing geothermal energy production, Turkey can reduce its dependency on natural gas and coal imports. Geothermal energy, offering continuous production, provides a more resilient alternative against fluctuations in foreign energy prices. Furthermore, the diversification of Turkey's energy sources will enhance the country's energy security and mitigate the risks posed by international energy market fluctuations.

- **Contribution to Local Economy:** Geothermal energy plants create local employment during installation and operation stages. Moreover, industries based on geothermal resources, such as greenhouse farming and thermal facilities, can support local development. This creates significant opportunities for social and economic development. In addition, geothermal energy will help reduce unemployment in geothermal-rich regions, stimulate regional businesses, and increase the standard of living for local communities.

4.4. Future Role of Geothermal Energy in Energy Planning and Strategies

Turkey’s goals to increase geothermal energy production will form part of its sustainable energy policy. Steps to enhance the role of geothermal energy in energy planning include:

- **Investment Incentives:** Turkey should develop policies to attract more investments in the geothermal energy sector. Particularly, support for innovative technologies and domestic production projects should be increased. This includes offering subsidies or tax incentives for companies that implement cutting-edge geothermal technologies and increase local production capabilities.
- **Research and Development:** Investments in R&D in the geothermal energy field will open the way for more sustainable energy production with efficiency-enhancing technologies. Widespread adoption of innovative methods such as closed-loop systems and high-enthalpy reservoirs is required. Collaborations between universities, private companies, and government institutions will be essential for accelerating R&D and ensuring that new technologies can be quickly brought to market.
- **Integrated Energy Strategies:** Geothermal energy should not only be used for electricity production but also for regional heating, greenhouse farming, and industrial processes, which would make it much more efficient. Therefore, integrated energy planning targeting multiple sectors should be implemented. This multi-sector approach will reduce the need for fossil fuels in heating, agriculture, and industry, creating a comprehensive renewable energy ecosystem.

Geothermal energy holds an important place in Turkey’s energy strategy, and this role is expected to strengthen by 2030. In addition to its share in electricity generation, geothermal energy will support Turkey’s energy security and sustainable development through its applications in hot water use and local development. Proper management of Turkey’s geothermal energy potential will help achieve domestic and renewable energy goals. With the right investments and policies in place, geothermal energy has the potential to become one of the cornerstones of Turkey’s transition to a more sustainable and energy-independent future.

5. MATERIAL AND METHOD

This section will focus on estimating Turkey's geothermal energy electricity generation capacity until 2030.

Table 1. Turkey's Geothermal Energy Electricity Generation Capacity

Year	Geothermal energy installed capacity (MW)	Annual electricity production (MWh)	Annual capacity factor (%)	Number of geothermal power plants
2018	1,320 MW	5,670,000 MWh	68%	51
2019	1,430 MW	6,110,000 MWh	70%	56
2020	1,515 MW	6,520,000 MWh	72%	60
2021	1,600 MW	6,860,000 MWh	74%	62
2022	1,700 MW	7,120,000 MWh	75%	65
2023 (Estimated)	1,800 MW	7,300,000 MWh	76%	68

Explanations:

- **Geothermal Energy Installed Capacity (MW):** The total installed capacity of geothermal energy plants in Turkey. This represents the maximum electricity that can be produced by geothermal plants.
- **Annual Electricity Production (MWh):** The total annual electricity production by geothermal plants. This value is based on the production capacity calculated from the installed capacity.

- Annual Capacity Factor (%): Shows how efficiently an energy plant utilizes its installed capacity. A higher value indicates more efficient operation.
- Number of Geothermal Power Plants: The number of active geothermal energy plants in Turkey.

Methodology:

For this analysis, we selected the linear regression method. Using the historical data on installed capacity (MW) and annual electricity production (MWh) from the past years, we can make predictions for future geothermal energy production. In this model, time (year) will be treated as the independent variable, and the installed capacity or annual production will be the dependent variable. Figure 2 shows the flow chart of the LR algorithm.

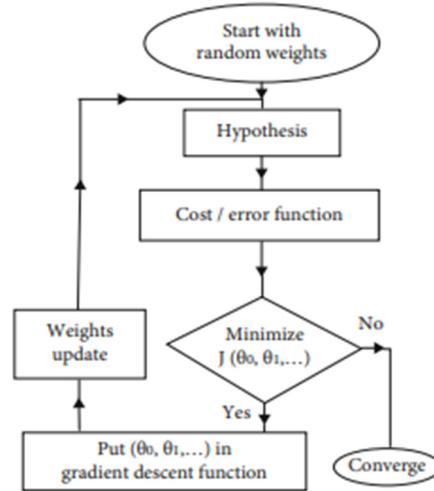


Figure 2. Flow chart of linear regression [31]

The pseudocode of the Linear Regression Alignment Algorithm is as shown in Figure 3.

```

Preliminaries
combine all  $n$  LC/MS runs
build overlapping mass-windows across combined runs
1. Cluster Analysis
for each mass-window do
  use  $p$  peaks with highest intensities
  calculate distance matrix of pairs of peaks  $(j, h)$ 
  
$$d_{j,h} = \begin{cases} \text{diff}(mass), & \text{if } \text{diff}(rt) < k_1 \wedge \text{diff}(\log_{10}(intensity)) < k_2 \\ \infty, & \text{if } \text{diff}(rt) \geq k_1 \vee \text{diff}(\log_{10}(intensity)) \geq k_2 \end{cases}$$

  hierarchical average linkage cluster analysis
  cut cluster-tree at mass accuracy  $\Delta_m$ 
  if  $n_{dup} < \text{threshold}_1 \wedge n_{miss} < \text{threshold}_2$  then
    cluster is 'well-behaved'
  delete duplicated 'well-behaved' clusters
  for each 'well-behaved' cluster do
     $\tilde{rt} = \text{median}(rt)$ 
    for each peak  $i$  do
       $dev_i = rt_i - \tilde{rt}$ 
2. Regression
for each run  $s$  do
  take only peaks from 'well-behaved' clusters
  fit regression line  $dev_{s,i} = a_s + b_s * rt_i$ 
  by minimizing  $\sum (dev_i - dev_{s,i})^2$ 
Correction
for each run  $s$  do
  for each peak  $i$  do
     $rt_{cor,i} = rt_i - \hat{dev}_{s,i}$ 
  
```

Figure 3. Pseudocode of linear regression alignment algorithm [32]

Steps:

- Collection and Analysis of Historical Data: First, we will analyze the data from 2018 to 2023.
- Linear Regression Model: We will create a linear regression model for these years. The model will be of the form:

$$Y = a.t + b \tag{1}$$

Where:

- Y is the predicted value (installed capacity or annual production),
- t is the year,
- a is the slope coefficient, and
- b is the constant term.
- Prediction for 2023-2030: Using the model, we will calculate the predictions for 2023 to 2030.

5.1. Historical Data (2018-2023)

We will use the data in Table 2 below to perform the linear regression.

Table 2. Historical data

Year	Installed capacity (MW)	Annual electricity production (MWh)
2018	1,320	5,670,000
2019	1,430	6,110,000
2020	1,515	6,520,000
2021	1,600	6,860,000
2022	1,700	7,120,000
2023	1,800	7,300,000

5.2. Linear Regression Model

The foundation of linear regression is to find the relationship between the year (t) and the installed capacity (Y). The formula is as follows:

$$Y = a.t + b \tag{2}$$

It is assumed that there is a simple linear relationship between year and installed capacity. To find this relationship with the data from 2018 to 2023, we need to compute the slope coefficient (a) and the constant term (b). These calculations are done using the sum of the values.

We can calculate the slope and constant term as follows:

- Slope (a) = $\frac{n \sum(t_i Y_i) - \sum t_i \sum Y_i}{n \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2}$ (3)

- Constant Term (b) = $\frac{\sum Y_i - a \sum t_i}{n}$ (4)

Using these formulas, we computed the slope coefficient and constant term based on the 2018-2023 data. The results are:

- Slope (a) \approx 90.57 MW/year

This means the installed capacity increases by an average of 90.57 MW per year.

- Constant Term (b) \approx 1,141.6 MW

This is close to the starting installed capacity in 2018.

5.3. Prediction for 2023-2030

Now, we can make annual predictions for installed capacity from 2023 to 2030 using the slope coefficient we obtained from the model. The formula will be:

$$Y_{2023} = 1,800 + 90.57 \cdot (t - 2023) \quad (5)$$

When this formula is applied for the years 2024-2030, the following predicted results are obtained.

Table 3. Predicted installed capacity

Year	Predicted installed capacity (MW)
2024	1,890 MW
2025	1,980 MW
2026	2,070 MW
2027	2,160 MW
2028	2,250 MW
2029	2,340 MW
2030	2,430 MW

5.4. Electricity Production Prediction (MWh)

Electricity production is proportional to installed capacity and determined by the capacity factor. The capacity factor is expected to vary between 75% and 80% over time. To calculate electricity production, we can use the following formula:

$$\text{Annual Production} = \text{Installed Capacity} \times 8,760 \text{ hours/year} \times \text{Capacity Factor} \quad (6)$$

Assuming a capacity factor of 76% (0.76) for 2030, we can calculate the predicted electricity production for that year:

- **Predicted Installed Capacity for 2030:** 2,430 MW
- **Capacity Factor:** 76% (0.76)
- **Annual Electricity Production (MWh):** $2,430 \times 8,760 \times 0.76 \approx 13,615,000$ MWh

The predictions for 2024-2030 are as shown in the table 4 below.

Table 4. The predictions for 2024-2030

Year	Predicted installed capacity (MW)	Predicted annual electricity production (MWh)
2024	1,890 MW	7,515,000 MWh
2025	1,980 MW	7,770,000 MWh
2026	2,070 MW	8,030,000 MWh
2027	2,160 MW	8,290,000 MWh
2028	2,250 MW	8,550,000 MWh
2029	2,340 MW	8,810,000 MWh
2030	2,430 MW	9,070,000 MWh

This prediction shows that Turkey's geothermal energy capacity will continue to grow by approximately 100 MW per year until 2030, and electricity production will increase in parallel with this growth. This model is based on current growth trends and suggests that, with the influence of innovative technologies (e.g., closed-loop systems) and increased investments, higher production capacities may be achievable.

6. CONCLUSION

In conclusion, it is expected that Turkey's geothermal energy potential will continue to play a significant role as an important part of sustainable energy strategies in the future. By 2030, geothermal energy production capacity is projected to reach 2,500 MW with an average annual increase of 100 MW. This

growth will not only enhance Turkey's energy security but also contribute to achieving renewable energy targets. Furthermore, beyond electricity generation, the use of geothermal energy in areas such as district heating and greenhouse agriculture will support local development and create economic benefits. Increasing investments in Turkey's geothermal energy resources, integrating innovative technologies, and implementing integrated energy planning will contribute to the country's energy independence, while also significantly supporting environmental sustainability. In this context, it can be said that geothermal energy will occupy an even stronger position in Turkey's energy future and will be an effective tool in achieving sustainable development goals.

7. REFERENCES

1. Barbier, E. (2002). Geothermal energy technology and current status: an overview. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 6(1-2), 3-65.
2. Toklu, E.J.R.E. (2013). Overview of potential and utilization of renewable energy sources in Turkey. *Renewable Energy*, 50, 456-463.
3. Toklu, E., Güney, M., Işık, M., Comaklı, O. & Kaygusuz, K. (2010). Energy production, consumption, policies and recent developments in Turkey. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 14(4), 1172-1186.
4. Kaygusuz, K. & Kaygusuz, A. (2004). Geothermal energy in Turkey: the sustainable future. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 8(6), 545-563.
5. Melikoglu, M. (2017). Geothermal energy in Turkey and around the World: A review of the literature and an analysis based on Turkey's Vision 2023 energy targets. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 76, 485-492.
6. Hepbasli, A. & Ozgener, L. (2004). Development of geothermal energy utilization in Turkey: a review. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 8(5), 433-460.
7. Baba, A., Bundschuh, J. & Chandrasekharam, D. (2014). Geothermal systems and energy resources: Turkey and Greece. *CRC Press*.
8. Yuksel, I. & Kaygusuz, K. (2011). Renewable energy sources for clean and sustainable energy policies in Turkey. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 4132-4144.
9. Ozturk, M. & Yuksel, Y.E. (2016). Energy structure of Turkey for sustainable development. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 53, 1259-1272.
10. Kırılı, M.S. & Fahrioğlu, M. (2019). Sustainable development of Turkey: Deployment of geothermal resources for carbon capture, utilization, and storage. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, Environmental Effects*, 41(14), 1739-1751.
11. Karaoğlu, Ö. (2024). Hasan dağı volkanı ve çiftlik-bozköy (orta anadolu) gömülü kalderasını besleyen aktif magma odalarına ilişkin ısı transferi analizleri. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 1-27.
12. Şener, M.F., Uzelli, T., Akkuş, İ., Mertoğlu, O. & Alper, B. (2023). The Potential, utilization, and development of Geothermal Energy in Türkiye. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration, (early view)*, 1-1.
13. Işıksoluğu, M., Kurban, M. & Dokur, E. (2012). Jeotermal enerji santrallerinin Türkiye açısından değerlendirilmesi. *ELECO '2012 Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa.
14. Mertoglu, O., Simsek, S. & Basarir, N. Geothermal energy use: projections and country update for Turkey. In *Proceedings World Geothermal Congress, 2020*.
15. Satman, A., Serpen, U. & Korkmaz, B. (2007). An update on geothermal energy potential of Turkey. In *Thirty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University Stanford, California.
16. Dinçer, İ. & Ezan, M. (2020). *Tüba-jeotermal enerji teknolojileri raporu*.
17. Ocak, M., Ocak, Z., Bilgen, S., Keleş, S. & Kaygusuz, K. (2004). Energy utilization, environmental pollution and renewable energy sources in Turkey. *Energy Conversion Management*, 45(6), 845-864.
18. Ozgur, M.A. (2008). Review of Turkey's renewable energy potential. *Renewable Energy*, 33(11), 2345-2356.
19. Erdogdu, E. (2009). A snapshot of geothermal energy potential and utilization in Turkey. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2535-2543.
20. Simsek, H.A. & Simsek, N. (2013). Recent incentives for renewable energy in Turkey. *Energy Policy*, 63, 521-530.
21. Roche, V., Bouchot, V., Beccaletto, L., Jolivet, L., Guillou-Frottier, L., Tuduri, J., Bozkurt, E., Oguz, K. & Tokay, B. (2019). Structural, lithological, and geodynamic controls on geothermal activity in the Menderes geothermal Province (Western Anatolia, Turkey). *International Journal of Earth Sciences*, 108(1), 301-328.

22. Aşıcı, A.A. & Acar, S. (2022). Channels of cooperation between the EU and Turkey on green transformation. *Ankara Avrupa Çalışmaları Dergisi*, 21(1), 43-67.
23. Okoroafor, E.R., Smith, C.M., Ochie, K.I., Nwosu, C.J., Gudmundsdottir, H. & Aljubran, M.J. (2022). Machine learning in subsurface geothermal energy: *Two Decades in Review*. *Geothermics*, 102, 102401.
24. Hermans, T., Nguyen, F., Robert, T. & Revil, A. (2014). Geophysical methods for monitoring temperature changes in shallow low enthalpy geothermal systems. *Energies*, 7(7), 5083-5118.
25. Kumari, W. & Ranjith, P. (2019). Sustainable development of enhanced geothermal systems based on geotechnical research-A review. *Earth-Science Reviews*, 199, 102955.
26. Cui, G., Ren, S., Rui, Z., Ezekiel, J., Zhang, L. & Wang, H. (2018). The influence of complicated fluid-rock interactions on the geothermal exploitation in the CO2 plume geothermal system. *Applied Energy*, 227, 49-63.
27. Ciriaco, A.E., Zarrouk, S.J. & Zakeri, G. (2020). Geothermal resource and reserve assessment methodology: Overview, analysis and future directions. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 119, 109515.
28. Shortall, R., Davidsdottir, B. & Axelsson, G.J.R. (2015). Geothermal energy for sustainable development: A review of sustainability impacts and assessment frameworks. *Renewable and Sustainable Energy Eviews*, 44, 391-406.
29. Clauser, C. & Ewert, M. (2018). The renewables cost challenge: Levelized cost of geothermal electric energy compared to other sources of primary energy-Review and case study. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 82, 3683-3693.
30. Jeotermale Giden Adımlar, <https://alj.com/tr/spotlight-by-fady-jameel/jeotermale-giden-adimlar//>. Access date: 24.03.2025.
31. Siddiqui, R., Anwar, H., Ullah, F., Ullah, R., Rehman, M.A., Jan, N. & Zaman, F. (2021). Power prediction of combined cycle power plant (CCPP) using machine learning algorithm-based paradigm. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2021(1), 9966395.
32. Podwojski, K., Fritsch, A., Chamrad, D.C., Paul, W., Sitek, B., Stühler, K., Mutzel, P., Stephan, C., Meyer, H.E. & Urfer, W. (2009). Retention time alignment algorithms for LC/MS data must consider non-linear shifts. *Bioinformatics*, 25(6), 758-764.





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 yayımlansın veya yayımlanmasın iade edilmez. Makaleleri yayımlama 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** yalın bir dil ve anlatımla yazılmalı, makale Türkçe ise Türkçe, makale İngilizce ise İngilizce yazım kurallarına uygun olmalıdır.

Bölüm ve alt bölüm başlıkları numaralanmalıdır. Eşitlikler (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, yayınlandığı yer, son sayfa no.

Bildiri ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi., yıl. bildirim 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, bildirim 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, yayınlandığı yer.

Web Sitesi ise: Yazar(lar) belli ise; yazarın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar, varsa yayınlandığı yıl. yazım başlığı, web adresi (<http://www.xxxxx.xxx.xxx>), Erişim Tarihi: gün.ay.yıl.

Kurum/Kuruluşlara ait ise: Kurum adı, varsa yayınlandığı yıl. yazımın 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 yayınlandığı yıl, konunun tam adı, Erişim Tarihi: gün.ay.yıl.