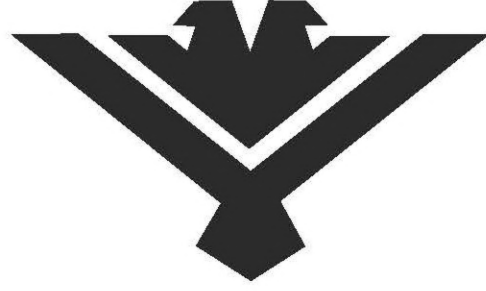


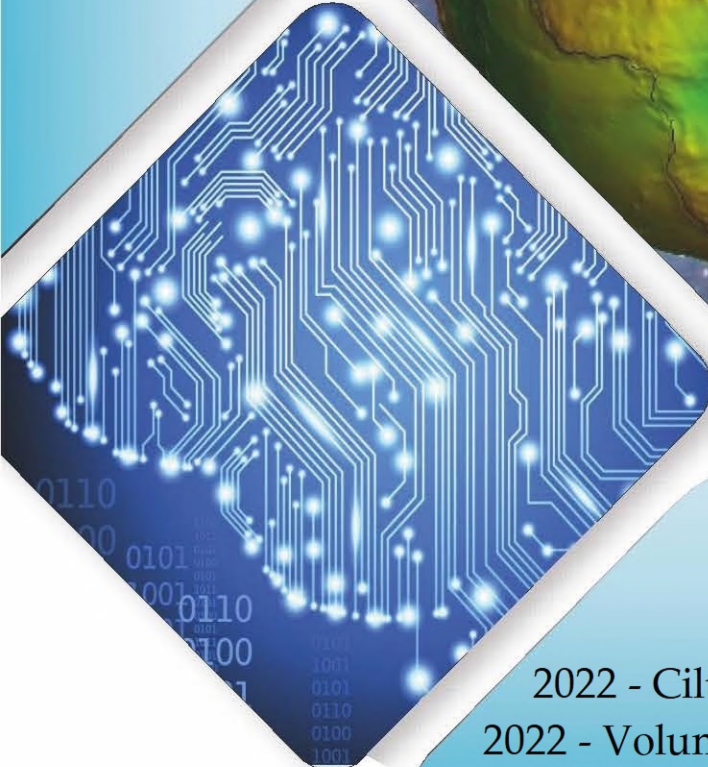


Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi

Konya Journal of Engineering Sciences



(KONJES)
E-ISSN: 2667-8055



2022 - Cilt: 10 - Sayı: 3
2022 - Volume: 10 - Issue: 3

**KONYA JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES (KONJES)
KONYA MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ**

HAKEMLİ DERGİDİR

OWNER/SAHİBİ

Owner on Behalf of Engineering and Natural Sciences Faculty of Konya Technical University **Prof. Dr. Halil Kür ad ERSOY**
Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Adına Dekan **Prof. Dr. Halil Kür ad ERSOY**

Chief Editor/Şef Editör

Prof. Dr. Mustafa TABAKCI

Editors/Editörler

Prof. Dr. Halife KODAZ

Assoc. Prof. Dr. Ömer Kaan BAYKAN

Section Editors/Alan Editörleri

Prof. Dr. A. Afşin KULAKSIZ

Prof. Dr. Hüseyin DEVEC

Prof. Dr. İhsan ÖZKAN

Assoc. Prof. Dr. Alpaslan YARAR

Assoc. Prof. Dr. Ömer Kaan BAYKAN

Assoc. Prof. Dr. Volkan KALEM

Assist. Prof. Dr. Alper DÖYEN

Assist. Prof. Dr. Selim DOĞAN

Assist. Prof. Dr. Secan BÜLBÜL

Assist. Prof. Dr. Muhammed Arif EN

Advisory Board/Danışma Kurulu

Prof.Dr. Ferruh YILDIZ, Konya Technical University

Prof.Dr. Reşat ULUSAY, Hacettepe University

Prof.Dr. Ibaraki SOICHI, Kyoto University

Prof.Dr. Matchavariani LIA, Tbilisi State University

Prof.Dr. Seref SAGIROGLU, Gazi University

Prof.Dr. Vijay P. SINGH, Texas A and M University

Prof.Dr.-Ing. Rudolf STAIGER, Bochum University of Applied Sciences

Prof.Dr. Chryssy POTSIU, National Technical University of Athens

Prof.Dr. Lena HALOUNOVA, Czech Technical University

Prof.Dr. Petros PATIAS, The Aristotle University

Prof.Dr. Sitki KULUR, Istanbul Technical University

Language Editing/Yabancı Dil Editörü

Prof. Dr. Ali BERKTAY

Composition and Printing/Baskı ve Dizgi

Assist. Prof. Dr. İsmail KOC

Dr. Emel Zeray OZTURK

Res. Assist Emir Ali DINSEL

Res. Assist. Aybüke BABADAG

Correspondance Address/ Yazışma Adresi

Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Dekanlığı

42075-Kampüs, Selçuklu, Konya-TURKEY

Tel : 0 332 223 88 18

Fax : 0 332 241 06 35

E-mail : konjes@ktun.edu.tr

Web : <http://dergipark.org.tr/konjes>

Editorial Board/Yayın Kurulu

Ahmet Afsin Kulaksiz, Konya Technical University, TURKEY

Alla Anohina-Naumeca, Riga Technical University, LATVIA

Ashok K. Mishra, Clemson University, USA

Baris Binici, Middle East Technical University, TURKEY

Coskun Bayrak, University of Arkansas, USA

Demetrio Fuentes Ferrera, University of Castilla-La Mancha, SPAIN

Fahrettin Ozturk, The Petroleum Institute, UAE

Haci Murat Yilmaz, Aksaray University, TURKEY

Heinz Ruther University of Cape Town, SOUTH AFRICA

Homayoun Moghimi, Payame Noor University, IRAN

Ihsan Ozkan, Konya Technical University, TURKEY

John Trinder, The University of New South Wales, AUSTRALIA

Kerim Kocak, Konya Technical University, TURKEY

Loredana Judele, Technical University of Iasi, ROMANIA

Mohamed Bouabaz, Université 20 août 1955-Skikda, ALGERIA

Mohd Arif Wani, California State University, USA

Mortaza Yari, University of Tabriz, IRAN

Ömer Aydan, University of the Ryukyus, JAPAN

Sanchoy K. Das, New Jersey Institute of Technology, USA

Selim Dogan, Konya Technical University, TURKEY

Spase Shumka, Agricultural University of Tirana, ALBANIA

Tahira Geroeva, Baku State University, AZERBAIJAN

Vladimir Androkhonov, Novosibirsk Soil Research Institute, RUSSIA

Ali Kocak, Yildiz Technical University, TURKEY

Alpaslan Yarar, Konya Technical University, TURKEY

Ataur Rahman, University of Western Sydney, AUSTRALIA

Cihan Varol Sam Houston State University, USA

Dan Stumbea, Alexandru Ioan Cuza University of Iasi, ROMANIA

Eva Burgetova, Czech Technical University, CZECH REPUBLIC

Georgieva Lilia, Heriot-Watt University, UNITED KINGDOM

Halil Kursad Ersoy, Konya Technical University, TURKEY

Hi-Ryong Byun, Pukyong National University, SOUTH KOREA

Huseyin Devenci, Konya Technical University, TURKEY

Iraida Samofalova, Perm University, RUSSIA

Juan Maria Menendez Aguado, University of de Oviedo, SPAIN

Laramie Vance Potts, New Jersey Institute of Technology, USA

Mila Koeva, University of Twente, NETHERLANDS

Mohamed Metwaly Abu Anbar, Tanta University, EGYPT

Moonis Ali Khan, King Saud University, KSA

Murat Karakus, University of Adelaide, AUSTRALIA

Saadettin Erhan Kesen, Konya Technical University, TURKEY

Selcuk Kursat Isleyen, Gazi University, TURKEY

Shukri Maxhuni, Prizen University, KOSOVA REPUBLIC

Syed Tufail Hussain Sherazi, University of Sindh, PAKISTAN

Thomas Niedoba, AGH University of Science and Technology, POLAND

Zoran Sapuric, University American College Skopje, MACEDONIA

KONYA MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ
Konya Journal of Engineering Sciences
(KONJES)

ISSN 2667 – 8055 (Elektronik)

Cilt	10	Eylül	2022	Sayı	3
Volume	10	September	2022	Issue	3

İÇİNDEKİLER (CONTENTS)

Araştırma Makalesi (Research Article)

İÇME SUYU DAĞITIM SİSTEMLERİNDE ÖNLENEBİLECEK EN UYGUN SIZINTI HACMİNİN VE ORANININ BELİRLENMESİ

Determining the Most Appropriate Recoverable Leakage Volume and Rate in Water Distribution Systems

Salih YILMAZ, Mahmut FIRAT 524-534

ZEYTİN YAPRAĞINDAKİ HASTALIKLARIN SINIFLANDIRILMASINDA ÖN EĞİTİMLİ EVRİŞİMLİ SİNİR AĞLARININ PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

Performance Investigation of Pre-Trained Convolutional Neural Networks in Olive Leaf Disease Classification

Bünyamin DİKİCİ, Mehmet Fatih BEKÇİOĞULLARI, Hakan AÇIKGÖZ, Deniz KORKMAZ 535-547

NUMERICAL EXAMINATION OF A SOLAR CHIMNEY POWER PLANT DESIGNED FOR THE İSKENDERUN REGION

İskenderun Bölgesi İçin Tasarlanan Güneş Baca Santrali Sayısal İncelemesi

Mustafa ÖNAL, Ali KOÇ, Özkan KÖSE, Yıldız KOÇ, Hüseyin YAĞLI (English) 548-562

OBSERVER BASED SLIDING MODE CONTROLLER DESIGN FOR POSITION CONTROL OF A SERVO SYSTEM HAVING UNCERTAINTIES AND DISTURBANCES

Belirsizlik ve Bozuculara Sahip Bir Servo Sistemin Konum Kontrolü İçin Gözlemci Tabanlı Kayan Kipli Kontrolcü Tasarımı

Ümit ÖNEN (English) 563-577

GNSS KOD (PSEUDORANGE) ÖLÇÜLERİ İLE TEK NOKTA KONUM BELİRLEME YAZILIMI: KTUN_SPP

Single Point Positioning Software with GNSS Code (Pseudorange) Observations: KTUN_SPP

Emre AYSO, Muzaffer KAHVECİ 578-598

SDS SURFACTANT EFFECTS ON STABILITY AND THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF Al₂O₃- WATER BASED NANOFLUIDS

SDS Yüzey Aktif Maddesinin Al₂O₃-Su Bazlı Nanoakışkanların Kararlılığı ve Termofiziksel Özellikleri Üzerine Etkileri

Aycan ALTUN, Osman Nuri ŞARA, Semahat DORUK (English) 599-612

- PRESSURE DEPENDENCIES OF RELATIVE CHANGE IN ELECTRICAL RESISTANCE, GAGE FACTOR AND POISSON'S RATIO IN BARE OPTICAL FIBERS**
Kılıfsız Optik Fiberlerde Bağlı Direnç Değişimi, Gage Faktörü ve Poisson Oranı'nın Basınç Bağımlılıkları
Abdurrahman GÜNDAY (English) 613-622
- THE INFLUENCE OF TANGENTIAL EDGE RESTRAINTS ON THE NONLINEAR RESPONSE OF LAMINATED COMPOSITE CYLINDRICAL PANELS SUBJECT TO A PINCHING FORCE**
Teğet Sınır Şartlarının Ortasından Tekil Yüklü Katmanlı Kompozit Silindirik Panellerin Nonlinear Davranışlarına Etkisi
İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ (English) 623-633
- FARKLI EĞİM AÇILARINDA GÜNEŞ KOLLEKTÖRLERİNİN ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ: ERZİNCAN İLİ ÖRNEĞİ**
Energy and Exergy Analysis of Solar Collectors Having Different Tilt Angles: Case Study of Erzincan City
Muhammet Yasin KABA, Aslıhan KURNUÇ SEYHAN, Pınar CELEN, Ali CELEN..... 634-648
- KENTSEL HAVA TAŞIMACILIĞINDA KULLANILACAK DİKEY İNİŞ-KALKIŞ KABİLİYETİNE SAHİP BİR HAVA ARACININ KAVRAMSAL TASARIMI VE MENZİL HESABI**
Conceptual Design and Range Calculation of a Vertical Landing-Takeoff Aircraft to be Used in Urban Air Mobility
Tolunay DAĞ, Tarık ÜNLER, Engin Hasan ÇOPUR, Uğur ÇAKIN 649-664
- THEVENİN TEMELLİ GERİLİM KARARLILIK İNDEKSİ KULLANILARAK DAĞITIM SİSTEMLERİNİN YENİDEN YAPILANDIRILMASI**
Reconfiguration of Distribution Systems Using Thevenin Based Voltage Stability Index
Talha Enes GÜMÜŞ, Selçuk EMİROĞLU, Selim MERİÇ, Mustafa TURAN 665-678
- PERFORMANCE ANALYSIS OF A THERMOSIPHON CHARGED WITH DEIONIZED WATER/ ETHYLENE GLYCOL MIXTURE BASED GRAPHENE NANO PLATELET NANOFLUID**
Deiyonize Su/ Etilen Glikol Karışımı Bazlı Grafen Nano Plaka İçeren Nanoakışkan ile Şarj Edilen Bir Termosifonun Performans Analizi
Kerim MARTIN (English) 679-691
- NORMALİZE ISIL İŞLEMİNDE ARAKRİTİK ÖSTENİTLEME SICAKLIĞININ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ**
Effect of Intercritical Austenitization Temperatures in Normalizing Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Ductile Iron
Kutay KAYAALP, Ömer ŞAHİN, Volkan KILIÇLI 692-703
- PERFORMANCE INVESTIGATION OF BIFACIAL PHOTOVOLTAIC PANELS AT DIFFERENT GROUND CONDITIONS**
Çift Yüzlü Fotovoltaik Panellerin Farklı Zemin Koşullarında Performansının İncelenmesi
Muharrem Hilmi AKSOY, Murat Kubilay ÇALIK (English) 704-718
- KAVİTE ÇIKIŞ KENARININ GÜRÜLTÜ SEVİYESİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**
Investigation of the Effect of Cavity Trailing Edge on Noise Level
Sercan YAĞMUR, Sercan DOĞAN 719-731

SYNERGISTIC EFFECT OF ESSENTIAL OILS AND SILVER NANOPARTICLES SYNTHESIZED USING GELATIN FOR ANTIBACTERIAL, SOIL RESPIRATION AND SOIL ENZYME ACTIVITIES

Jelatin Kullanılarak Sentezlenen Gümüş Nanopartiküller ile Esansiyel Yağların Antibakteriyel, Toprak Solunum Ve Toprak Enzim Aktivitelerinde Sinerjistik Etkisi

Büşra ESİRGENLER, Fatih ERCİ (English) 732-749

ADVANCED TURKISH FAKE NEWS PREDICTION WITH BIDIRECTIONAL ENCODER REPRESENTATIONS FROM TRANSFORMERS

Çift Yönlü Transformatör Kodlayıcı Temsilleriyle Gelişmiş Türkçe Sahte Haber Tahmini

Mehmet BOZUYLA (English) 750-761

A SYSTEMATIC AND EFFICIENT INPUT SELECTION METHOD FOR ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS USING MIXED-INTEGER NONLINEAR PROGRAMMING

Kesikli ve Sürekli Optimizasyon Kullanarak Yapay Sinir Ağları için Sistemik Girdi Seçimi Yöntemi

Hasan SILDİR, Erdal AYDIN (English) 762-773

THE POSSIBLE THERAPEUTIC IMPACTS OF PHOTOBIO-MODULATION AND LOW-DOSE PHOTODYNAMIC THERAPY ON HUVECS TOWARDS ANGIOGENESIS: A COMPARATIVE IN VITRO ANALYSIS

Fotobiyomodülasyon ve Düşük Doz Fotodinamik Terapinin HUVEC Hücrelerindeki Anjiyogenez'e Yönelik Olası Terapötik Etkileri: Karşılaştırmalı İn Vitro Analiz

Dilara PORTAKAL KOÇ, Günnur PULAT, Nermin TOPALOĞLU (English) 774-792

LAND MANAGEMENT PARADIGM: GLOBAL AGENDA AND THE CASE IN TÜRKİYE

Arazi Yönetim Paradigması: Küresel Gündem ve Türkiye'deki Durum

Orhan ERCAN (English) 793-806



İÇME SUYU DAĞITIM SİSTEMLERİNDE ÖNLENEBİLECEK EN UYGUN SIZINTI HACMİNİN VE ORANININ BELİRLENMESİ

¹Salih YILMAZ , ²Mahmut FIRAT 

¹Çankırı Karatekin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Çankırı, TÜRKİYE

²İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya, TÜRKİYE

¹salihyilmaz@karatekin.edu.tr ²mahmut.firat@inonu.edu.tr

Geliş/Received: 01.03.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 06.06.2022

ÖZ: İçme suyu dağıtım sistemlerinde meydana gelen arızalar sonucunda yıllık olarak önemli miktarda su kaybolmaktadır. Bu sızıntıların azaltılması ve yönetilmesi için çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Bu çalışmada dağıtım sistemlerinde sızıntıların azaltılması için uygulanan temel yöntemler dikkate alınarak en uygun önlenebilir sızıntı hacminin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bunun için aktif sızıntı kontrolü, basınç yönetimi, şebeke rehabilitasyonu ve ekip yönetimi gibi temel yöntemler göz önünde bulundurulmuştur. Bu yöntemler için maliyetler ve potansiyel faydalar belirlenmiştir. Bu fayda maliyetler kullanılarak optimizasyon tabanlı bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen model pilot izole bölgede uygulanmıştır. İzole bölgeden alınan veriler dikkate alınarak optimizasyon algoritması ile her bir yöntem için önlenebilir sızıntı hacimleri analiz edilmiştir. Bölgede başlangıçta toplam kayıp miktarı 3,68 l/s (%36,01) olarak hesaplanmıştır. Optimizasyon modeline göre bölgede en uygun kayıp miktarı 1,36 l/s (%13,27) olarak belirlenmiştir. Buna göre bölgede ekonomik olarak azaltılabilecek toplam kayıp miktarı 2,32 l/s olarak tespit edilmiştir. En fazla fayda 1,53 l/s ile basınç yönetiminden elde edilmektedir. Analiz sonuçlarına göre uygulanması gereken yöntemler ve bu yöntemlerden elde edilecek faydalar sıralanmıştır. Elde edilen sonuçların özellikle sahada teknik personel için önemli katkılar sunacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: İçme Suyu Dağıtım Sistemi, Sızıntı, Önlenebilir Sızıntı Hacmi, Ekonomik Analiz

Determining the Most Appropriate Recoverable Leakage Volume and Rate in Water Distribution Systems

ABSTRACT: A significant amount of water is lost annually as a result of malfunctions in drinking water distribution systems. Various methods are applied to reduce and manage these leaks. In this study, it is aimed to determine the most appropriate preventable leakage volume by considering the basic methods applied to reduce leakages in distribution systems. For this, basic methods such as active leakage control, pressure management, network rehabilitation and team management have been considered. Costs and potential benefits have been identified for these methods. An optimization-based model was developed using these benefit costs. The developed model was applied in the pilot isolated region. Considering the data taken from the isolated area, the preventable leakage volumes for each method were analyzed with the optimization algorithm. The total loss amount in the current situation is calculated as 3.68 l/s (36.01%). The most appropriate loss amount in the region was determined as 1.36 l/s (13.27%) by the optimization model. The total amount of loss that can be economically reduced in the region has been determined as 2.32 l/s. It was seen that the most benefit will be obtained from pressure management with 1.53 l/s. According to the results of the analysis, the methods to be applied and the benefits to be obtained from

these methods are listed. It is thought that the results obtained will make important contributions especially to the technical personnel in the field.

Keywords: *Water Distribution System, Leakage, Preventable Leakage Volume, Economic Analysis*

GİRİŞ (INTRODUCTION)

İçme suyu dağıtım sistemleri en temel alt yapı sistemleridir. Bu sistemlerde çeşitli faktörlere bağlı olarak meydana gelen arızalar, işletme koşullarını bozmakta, maliyetleri arttırmakta, abone şikâyetlerinin artmasına ve hizmet kalitesinin düşmesine neden olmaktadır (Farley ve Trow, 2003; Lambert, 2002; Farley ve Liemberger, 2005). Sürdürülebilir kentsel su yönetiminde, arıza oranının ve sızıntı miktarının azaltılması, su ve enerji verimliliğinin sağlanması ve yatırım ve işletme maliyetinin azaltılması açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle bu sızıntıların önlenmesi, kontrol altına alınması ve yönetilmesi için en uygun yöntemin belirlenmesi gerekir. Literatürde, sızıntı yönetiminde uygulanan temel yöntemler, izole bölgelerin oluşturulması (Alvisi ve diğ., 2019; Creaco ve Haidar, 2019; Liu ve Lansey, 2020), minimum gece debisi analizi (Amoatey ve diğ., 2018; Al-Washali ve diğ., 2019; Negharchi ve Shafaghat, 2020), sızıntı yerinin tespiti ve arıza onarım hızı ve kalitesinin iyileştirilmesi (AL-Washali ve diğ., 2018; Savic ve Kapelan, 2019), şebeke yenileme ve boru malzemesi yönetimi (Lakehal ve Laouacheria, 2017; Salehi ve diğ., 2017) şeklindedir. Bu yöntemler uygulanarak sızıntıların izlenmesi, tespit edilmesi, kontrol edilmesi ve yönetilmesi mümkün olmakla birlikte, yöntemlerin gereksinimleri, kısıtları, ilk kurulum ve işletme-bakım maliyetleri önemli seviyelere ulaşmaktadır. Bu nedenle, sistemin işletme bileşenlerinin dikkate alınması, su kayıp bileşenleri için ekonomik analizlerin yapılması ve fayda ve maliyet analiz modelinin tanımlanması, etkin, ve sürdürülebilir su kayıp yönetimi açısından oldukça önemlidir (Ezbakhe ve Foguet, 2019; Jensen ve Nair, 2019; Lopez ve diğ., 2019). Bilindiği üzere her bir sistemin karakteristiği, işletme ve çevresel özellikleri, su kayıp oranları farklılık göstereceğinden dolayı tüm sistemlerde su kayıplarının aynı seviyeye indirilmesi mümkün değildir. Bundan dolayı, sızıntı oranının azaltılması ve kabul edilebilir seviyeye indirilebilmesi için, sistemin mevcut koşulları, teknik ve personel alt yapısı göz önünde bulundurularak en uygun stratejinin belirlenmesi gerekir. Sızıntı oranının azaltılması için idareler tarafından birçok uygulama gerçekleştirilmektedir. Bununla birlikte, sızıntı yönetiminde genellikle belli hedefler tanımlanmakta ve buna ulaşmak için yüksek maliyet oluşturan yatırımlar yapılmaktadır. Fakat birçok durumda fayda maliyet analizi esas alınmadığı için yapılan yatırımlar ekonomik olmamaktadır. Su kayıp yönetiminde sistemin mevcut koşullarının göz önüne alınması, en uygun önleme stratejisinin seçilmesinde ekonomik analizlerin yapılarak ekonomik kaçak seviyesinin tanımlanması gerekliliği literatürde yapılan çalışmalarda vurgulanmıştır (Wyatt ve Alshafey, 2012; Lim ve diğ., 2015; Haider ve diğ., 2019; Yılmaz ve diğ., 2021). Ayrıca, ekonomik kaçak seviyesinin tanımlanmasında ve analizinde, matematiksel ve istatistiksel yöntemleri esas alan çeşitli yaklaşımların uygulandığı görülmektedir (Moslehi ve diğ., 2019; Ahopelto ve Vahala, 2020).

Kentlerde nüfus artışına bağlı olarak su talebi artmakta ve sızıntıların önlenmesi ve kontrol altına alınması oldukça kritik bir noktaya gelmiştir. Bu nedenle idareler kayıp oranlarını düşürmek için çok fazla yatırımlar yapmaktadır. Su kayıplarının azaltılması için kullanılacak her yöntem bir maliyet doğuracağı gibi, şebekenin mevcut durum ve özelliklerine göre çeşitli faydalar da sağlayacaktır. Ancak su kayıp yönetiminde ve strateji geliştirmede en önemli bileşen ekonomik olarak ulaşabilecek sızıntı hedefinin tanımlanmasıdır. Bu hedef sistemin karakteristiğine, işletme-tüketim ve talep verilerine, su üretim maliyetine ve işletme faaliyetlerine bağlı olarak tanımlanmalıdır (Islam ve Babel, 2013).

İçme suyu dağıtım sisteminde kayıpların azaltılması için harcanan birim maliyetin, su üretim/satış maliyetine eşit olduğu nokta Ekonomik Kayıp Seviyesi (EKS) olarak tanımlanabilir (Firat et al., 2021). Dağıtım sistemlerinde su kayıplarının EKS değerinden daha düşük seviyeye azaltılması, faaliyetlerin maliyetinin elde edilecek faydalardan olması nedeniyle su idareleri için ekonomik olmayacaktır.

Su kayıpları belirli bir seviyeye indirildikten sonra, bu genelde EKS olmalı, eğer bölgede su sorunu yok ise su tasarrufu sağlamak için yapılan yatırımlar ekonomik olmayan sonuçlar ortaya çıkaracaktır. Bir

dağıtım sisteminde sızıntıların daha iyi yönetilmesi ve sistematik analiz edilmesi için izole ölçüm bölgeleri oluşturulmalı, giriş debisi ve basınç düzenli izlenmelidir (Molinos-Senante ve diğ., 2016).

Ülkemizde Tarım ve Orman Bakanlığı tarafından 04 Ekim 2021 tarihinde "İçme Suyu Sistemlerinde Su Kayıplarının Azaltılmasına Yönelik İş Termin Planı Genelgesi" yayınlanmıştır. Bu genelgeye göre, Belediyeler tarafından, su kayıp oranlarını mevzuatın nihai hedefi olan %25 oranı ve altına indirmek üzere İş Termin Planı ve Detay Rapor hazırlanacaktır. İş termin planında, veri toplama sistemleri (Coğrafi bilgi sistemler (CBS), Merkezi Denetim ve Veri Sistemi (SCADA), Abone Yönetim Sistemi (ABYS), Arıza Yönetim Sistemi ve Çağrı Merkezi), fiziki kayıpların önlenmesi (izole ölçüm bölgelerinin ve basınç bölgelerinin tasarımı, Minimum Gece Debisi (MNF) analizi, sızıntı yerinin tespiti), idari kayıpların önlenmesi, altyapı sızıntı indeksi ve ekonomik kaçak seviye analizleri yer almaktadır. Yılmaz (2021) tarafından yapılan çalışmada içme suyu dağıtım sistemlerinde sürdürülebilir su yönetimi için ekonomik kaçak seviye modeli geliştirmiştir. Geliştirilen bu model yapay zeka optimizasyon algoritmasını temel almaktadır. Bu modelde içme suyu dağıtım sistemlerinde şebeke, abone ve kurum alt yapısı gibi birçok faktör dikkate alınarak analiz yapılmaktadır. Sızıntıların günlük izlenmesi, anında müdahale edilmesi ve onarılması faaliyetlerini izole ölçüm bölgeleri oluşturmadan yapmak mümkün değildir. Bu nedenle büyük dağıtım sistemlerinde bu tür analizler için öncelikle izole ölçüm bölgeleri oluşturulmalıdır. Ayrıca, su kayıplarını sıfıra indirmek ne ekonomik ne de teknik olarak mümkün olmadığı için önleme yöntemleri doğru bir şekilde analiz edilmeli ve öncelikli uygulanması gerekenler belirlenmelidir (Al-Washali ve diğ., 2020).

Sızıntı yönetiminde şebeke bileşenlerini (arıza ve sızıntı oranı, ekip sayısı, basınç limitleri, mevcut durum), önleme yöntemlerinin gereksinimlerini ve kısıtlarını ve bunların maliyet analizlerini dikkate alarak ekonomik kaçak seviyesinin tanımlanması bir optimizasyon problemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle ekonomik kaçak seviyesinin tanımlanmasında, arıza ve sızıntı üzerinde önemli etkiye sahip olan basıncın analiz edilmesi, sistem karakteristiğine göre en uygun basınç seviyesinin tanımlanması, arıza onarım hızının iyileştirilmesi için en uygun ekip sayısının tanımlanması, en önemli optimizasyon bileşenleridir. Bu nedenle, ekonomik kaçak seviyesinin tanımlanması için, arıza ve sızıntı oluşumuna neden olan tüm faktörlerin dikkate alınması, etkisinin analiz edilmesi, maliyet bileşenlerinin tanımlanması, fayda maliyet analizinin yapılması ve optimizasyon tabanlı modelin geliştirilmesi gerekmektedir. Bundan dolayı, bu çalışmada, sürdürülebilir su kayıp yönetiminde, sistem ve su kayıp bileşenleri, önleme yöntemlerinin gereksinimleri, kısıtları ve maliyet bileşenleri göz önünde bulundurularak, en uygun önlenebilir sızıntı hacminin ve oranının belirlenmesi ve bu orana ulaşmak için uygulanması gereken yöntemlerin tanımlanması amaçlanmıştır. Bunun için Yılmaz (2021) tarafından geliştirilen ekonomik kaçak seviye analiz modeli esas alınmıştır.

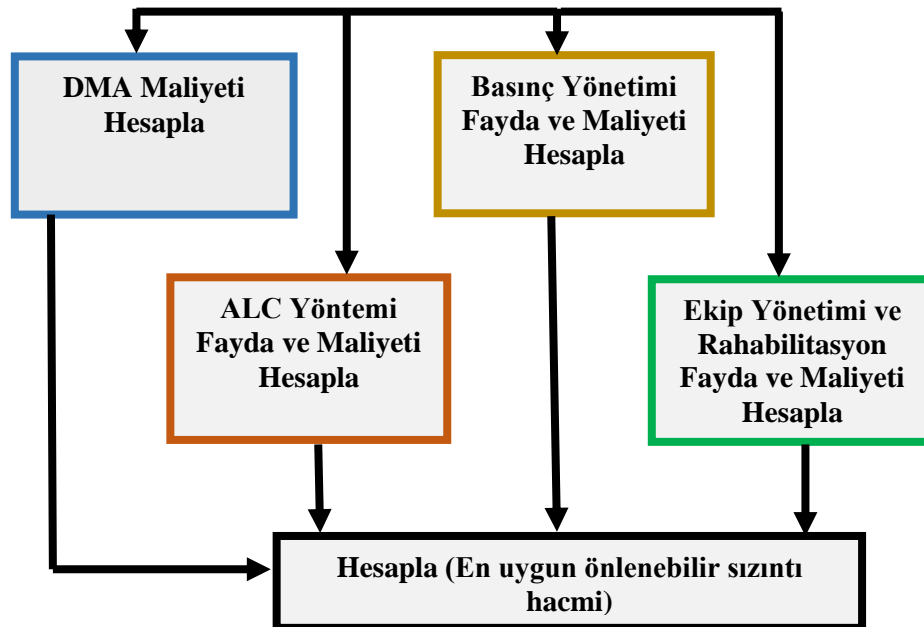
SIZINTI YÖNETİM MODELİ (LEAKAGE MANAGEMENT MODEL)

İçme suyu dağıtım sistemlerinde ekonomik olarak önlenebilecek sızıntı hacminin belirlenebilmesi için öncelikle su kayıplarını önleme yöntemleri iyi anlaşılmalı ve analiz edilmelidir. Fiziki kayıpların azaltılması için yapılan uygulamalar su kayıplarını azaltmanın yanı sıra çeşitli işletme ve uygulama maliyetleri de ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle kayıp azaltma çalışmaları yapılırken aynı zamanda seçilen ilgili yöntemler için ayrı ayrı fayda/maliyet analizlerinin yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada, sızıntı azaltma yöntemlerinden biri olan izole bölge tasarımı, basınç kontrol yöntemi, aktif kaçak kontrolü, şebeke yenileme için boru malzemesi gibi 4 farklı maliyet hesabında etki eden yapı kullanılmıştır. Bu yapıların matematiksel temelleri Yılmaz (2021) tarafından yapılan çalışmada detaylı bir şekilde sunulmuştur.

Yılmaz (2021) tarafından matematiksel temelleri ve algoritmik düzenleri verilen olan 4 adet maliyet hesabı terminolojisi dikkate alınmıştır (Şekil 1). İçme suyu kayıplarının azaltılması amacıyla kullanılan bu dört farklı yöntem birbirlerinden bağımsız değerlendirileceği gibi, sızıntılarla planlı bir mücadele kapsamında birlikte değerlendirilmesi daha doğru olacaktır. Kurulan algoritmalarda her bir yöntem için ortak değişkenler birlikte tanımlandığında sistemin ve kurulan algoritmaların ortak çözümleri de mümkün hale gelmektedir.

Bir izole bölgenin su kayıp yönetiminde kullanılabilmesi için yapılması gereken kontroller ve maliyet bileşenleri şu şekilde verilebilir, (i) giriş sayısına göre debimetre ve basınç ölçer ekipman, işçilik ve montaj maliyetleri, (ii) giriş debimetre odası, elektrik, veri transfer maliyetleri, (iii) izolasyon vana yerlerinin belirlenmesi ve saha imalatları maliyetleri, (iv) sıfır basınç testi maliyetleri, (v) sızıntı tespiti için, ekip, ekipman ve işletme maliyetleri (kullanılan ekipmana göre maliyetler değişmekte), (vi) tespit edilen arızaların bakım-onarım maliyetleri şeklindedir. Bu maliyetler, Kayseri Su ve Kanalizasyon İdaresi (KASKİ) ve Malatya Su ve Kanalizasyon İdaresi (MASKİ) hizmet alanındaki saha uygulamaları esas alınarak gerçek veriler üzerinden belirlenmiştir. Ayrıca, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2020 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları ve özel piyasa araştırmalarından da faydalanılmıştır. Böylece analiz yapılacak tüm bölgeler için kullanılabilir fiyatlar elde edilmiştir.

Basınç kontrol yönetiminde elde edilecek faydaların ve basınç yönetimi uygulamak için harcanacak tutarların analizlerinin detaylı bir şekilde yapılması gerekmektedir. Şebekenin mevcut durumu çalışma yapılmadan önce analiz edilmeli, olası basınç yönetimi uygulamasının senaryoları belirlenmelidir. Bu kapsamda elde edilecek faydalar ve kurulum maliyetleri kıyaslanarak basınç kontrol yöntemi için ekonomik fayda maliyet analizi yapılmalıdır.



Şekil 1. Şebeke Genel Maliyet Analizi İçin Akış Diyagramı (Yılmaz, 2021)

Figure 1. Flow Chart for Network Overhead Cost Analysis

Aktif kaçak kontrolü yönteminde, yöntemin fayda-maliyet analizinin ortaya konulması çok güçtür. Şebekelerin farklı fiziksel ve çevresel özelliklere sahip olmasına, akustik ekipmanları kullanan ve sızıntı yeri tespiti yapan ekiplerin saha tecrübesine ve cihazların ve malzemelerin kalitesine bağlı olarak yöntemin etkin faydaları bölgeden bölgeye değişim göstermektedir. Ekonomik kaçak seviyesinin tanımlanabilmesi için aktif kaçak kontrolünde uygulanan yöntemin fayda/maliyetlerinin hesaplanması gerekmektedir. Böylelikle ekonomik olarak aktif kaçak yöntemiyle kurtarılacak su miktarı belirlenecektir. Bu kapsamda literatür çalışmaları ve saha tecrübeleri referans alınarak birim su kaybının azaltılması için bileşenler ve maliyetleri hesaplanmıştır. Şekil 1’de verilen dört farklı yöntem için fayda maliyet bileşenleri ve hesaplamaları Yılmaz (2021) tarafından yapılan çalışmadan alınmıştır.

Su kayıpları ile mücadele stratejisi için tüm teknik ve ekonomik değişkenler dikkate alınarak bir model önerilmelidir. Bu nedenle, önlenebilir sızıntı hacminin oluşturulması için algoritmik yapı ve bu denklemlerin matematiksel arka planı ve çözüm yöntemleri dikkate alınmıştır. Eşzamanlı çözümler için ortak değişken tanımlanmış ve bu değişkenlerin su kayıplarının etkisi matematiksel olarak ifade edilmiştir. Bununla birlikte problem, analitik olarak çözülebilen basit bir denklemin çok ötesinde bir

problemdir. Özellikle problemin çevresel etkilere maruz kalması, bazı durumlarda problem çözümlerinde sayısal değerlerin olmaması vb. nedenlerle önerilen önlenebilir sızıntı hacminin belirlenmesi modelini analitik olarak çözmek son derece zordur. Bundan dolayı farklı yöntemler için zıt etkileri olduğu değişkenler bu kapsamda belirlenip ve optimizasyon algoritmaları yardımıyla ekonomik olarak azaltılabilecek minimum su kaybı seviyesi hesaplanmıştır. Önerilen algoritmik yapı ile temel olarak altı değişken hesaplanır (Yılmaz, 2021); i Şebekede kalan faydalı ömür, ii- Birim izole ölçüm bölgesi (DMA) oluşturma maliyeti, iii- Basınç Yönetimi ile elde edilecek faydalı debi, iv- ALC Yöntemi ile elde edilecek faydalı / ekonomik debi v- ekip sayısı optimizasyonu, vi- Sayaç rehabilitasyonu ile elde edilecek faydalı / ekonomik debi.

Su kayıp yönetiminde su kayıplarını azaltmak için temel yöntemler uygulamadan önce, mevcut şebekenin ekonomik analizi gereklidir. Ekonomik ömrünü tamamlamış bir şebeke için su kayıp azaltma yöntemlerinden ve dolayısıyla ekonomik kaçak seviyesinden bahsetmek mümkün olmayacaktır. Bu nedenle, önerilen algoritma ile önce ağın kalan faydalı ömrü hesaplanır. Basınç ve aktif kaçak kontrolü yönetimi, su kayıplarıyla mücadelede kritik öneme sahiptir. Bu iki yöntemin uygulanabilmesi için öncelikle izole bölgenin tanımlanması gerekir. Ancak, izole bölgelerde uygulanabilen bu iki yöntem için, yöntemlerin temel maliyet bileşenlerinden biri olan DMA oluşturma maliyeti optimizasyon öncesinde hesaplanır. Önerilen bu algoritmada, tüm ortak değişkenler, ekonomik kaçak seviyesi hesaplamasının her seviyesinde tanımlanmış ve adlandırılmıştır. Böylelikle tüm su kaybı yöntemlerinin uygulanması sırasında ortak çözümler elde edilebilir. Önerilen algoritmada, "basınç değeri" ve "ekip sayısı" değişkenleri, her döngü için EKS değerini hesaplamak için optimize edilir ve nihayet ulaşılan en düşük önlenebilir sızıntı hacmi, sistemin ekonomik noktası olarak tanımlanır (Yılmaz, 2021).

ANALİZLER (ANALYSIS)

İçme suyu dağıtım sistemlerinde en uygun önlenebilir sızıntı hacminin ve oranının belirlenmesi amacıyla pilot izole ölçüm bölgesinde analiz yapılmıştır. Öncelikle pilot izole bölgede (DMA1) 2021 yılına ait temel veriler temin edilmiş ve modele tanımlanmıştır (Çizelge 1). Bu veriler, analiz edilecek bölgenin temel özelliklerini temsil etmektedir. Bu kapsamda doldurulan tablo ile şebekenin hizmet verdiği nüfus, toplam şebeke uzunluğu, abone sayısı ve bağlantıların yanı sıra sistem giriş debisi ve tahakkuk miktarı, şebeke basıncı, sayaç bilgileri, yıllık arıza sayıları ve DMA özellikleri gibi şebekenin temel özellikleri ayrıca algoritmaya işlenmektedir (Çizelge 2). Ayrıca su üretim maliyeti, su satış fiyatı, ekip kurulum maliyeti gibi temel ekonomik bileşenler de sistemde tanımlanır (Çizelge 3). Bu şekilde, analiz için gerekli olan değişkenler algoritmaya tanımlanmış olacaktır.

Çizelge 1. Pilot İzole Ölçüm Bölgesi İçin Temel Şebeke Verileri (Yılmaz, 2021)

Table 1. Basic Network Data for Pilot Isolated Measurement Area (Yılmaz, 2021)

Çalışma Alanı ile İlgili Genel Bilgiler	Birim	Değer	Temin Edilen Veri tabanı
Hizmet Edilen Toplam Nüfus	kişi	5680	ABYS
Toplam Şebeke Uzunluğu	km	5	CBS
Toplam Abone Sayısı	adet	1420	ABYS
Toplam Ticari Abone Sayısı	adet	120	ABYS
Toplam Konut Abone Sayısı	adet	1300	ABYS
Toplam Abone Bağlantısı Sayısı	adet	529	CBS
Ortalama Abone Bağlantısı Uzunluğu	m	8	CBS
Sistemin Bölgesel Ortalama Gece Basıncı	m	60	SCADA
Minimum İşletme Basıncı	m	20	SCADA
Maksimum İşletme Basıncı	m	65	SCADA

Çizelge 2. Pilot İzole Ölçüm Bölgesi İçin İşletme Verileri (Yılmaz, 2021)*Table 2. Operational Data for the Pilot Isolated Measurement Area (Yılmaz, 2021)*

Parametreler	Birim	Değer
Sistem Giriş Debisi	l/s	10,22
Tahakkuk Edilen Su Miktarı	l/s	6,54
Ortalama Birim Su Maliyeti (Üretim ve İşletme Giderleri Dahil)	TL/m ³	2,91
Ortalama Birim Su Satış Fiyatı	TL/m ³	3,40
DMA var ise Toplam DMA şebeke uzunluğu	m	5000
Yıllık Arıza Miktarı (Abone ve Şebeke Arızası Toplamı)	adet	40
Yıllık Abone Arızası Miktarı	adet	14
Yıllık Şebeke Arızası Miktarı	adet	26
Toplam Arıza Ekibi Sayısı	adet	4
Arıza Ekibi Kurulum Maliyeti	TL/ekip/ay	₺19.500,00
Ortalama Arıza Çözüm Süresi	saat/adet	8

Çizelge 3. Pilot İzole Ölçüm Bölgesi İçin Şebeke Yenileme Verileri (Yılmaz, 2021)*Table 3. Network Renewal Data for the Pilot Isolated Measurement Area (Yılmaz, 2021)*

Şebeke Yenileme ve Boru Malzemesi İle İlgili Bilgiler	Birim	Değer
Şebekenin Mevcut Ağırlıklı Boru Cinsi	-	Pik
Ø 150 mm Küçük Boru Uzunluklarının Yüzdesi	%	65
Ø 150 mm - 300 mm Arası Değişen Boru Uzunluğu Yüzdesi	%	35
Ø 300 mm - 500 mm Arası Değişen Boru Uzunluğu Yüzdesi	%	0
Ø 500 mm - 700 mm Arası Değişen Boru Uzunluğu Yüzdesi	%	0
Ø 700 mm Büyük Boru Uzunluklarının Yüzdesi	%	0
Ortalama Şebeke Yaşı	Yıl	12
Şebeke Yenilenmesi Durumunda Yeni Yapılacak Boru Cinsi	-	HDPE

Daha sonra, izole bölge yaklaşımı ile ilgili veriler Çizelge 4'te gösterildiği gibi girilmelidir. Yukarıda belirtilen verilerle, izole bölge oluşturma için temel maliyet bileşenleri tanımlanır ve ihtiyaç duyulan izole bölge sayısı belirlendikten sonra, toplam izole bölge oluşturma maliyeti hesaplanır.

Çizelge 4. İzole bölge Maliyetlerinin Tanımlanması (Yılmaz, 2021)*Table 4. Definition of Isolated Zone Costs (Yılmaz, 2021)*

Parametre	Birim	Maliyet
Debimetre Odası ve Mekanik Teçhizat	TL/Adet	70.000,00
Sınır Vanaların Tespiti ve Konulması	TL/Adet	1.850,00
Sıfır Basınç Testi Yapılması	TL/Adet	750,00
İzleme ve İşletme Giderleri	TL/Adet	25.000,00

Temel şebeke verilerinin algoritmaya tanımlanmasının ardından izole bölge için önlenebilir en uygun sızıntı hacmi belirlenmiştir. Bu kapsamda algoritma şebeke için optimum basınç seviyesini ve ekip sayısını optimize etmektedir. Ayrıca aktif kaçak yöntemiyle elde edilecek faydalı debi, sayaç rehabilitasyon ile elde edilecek faydalı debi ve şebeke kalan ömrü hesaplanır. Yapılan optimizasyon sonucunda 4 temel su kaybı azaltma yöntemi için ekonomik analizler yapılmış ve her yöntemin ekonomik faydaları m³ / birim olarak hesaplanmıştır. Bu bağlamda optimizasyon sonucunda elde edilen değerler Çizelge 5'te gösterilmektedir.

Çizelge 5. İzole bölge için Optimizasyon Sonuçları*Table 5. Optimization Results for the isolated region*

Yöntem	Birim	Şebeke İlk Değeri	Optimizasyon Sonucu
Basınç	m	60	28,55
Ekip Sayısı	Adet	4	4

Sistem için hesaplanan en uygun değerlerde basıncın 60 m'den 28,55 m'ye düşürülmesi gerektiği ve örnek sistem için optimum ekip sayısının 4 olduğu hesaplanmıştır. Çizelgede verilen optimum basınç değeri optimizasyon tabanlı EKS modelinin çalıştırılması ile elde edilmiştir. Bu basınç değeri, dağıtım sisteminde sızıntıların azaltılması için uygulanan aktif sızıntı kontrolü ve basınç yönetiminin uygulanması durumunda en fazla faydanın elde edilebileceği seviyeyi ifade etmektedir. Bunun için detayları Yılmaz (2021) tarafından yapılan çalışmada verilen matematiksel altyapı temel alınmıştır. Hesaplanan optimum değerlere bağlı olarak şebekenin ilk ve optimum kayıp miktarları ve yüzdeleri Çizelge 6'da verilmektedir.

Çizelge 6. İzole bölge için en uygun kayıp oranları*Table 6. Optimal leakage rates for the isolated area*

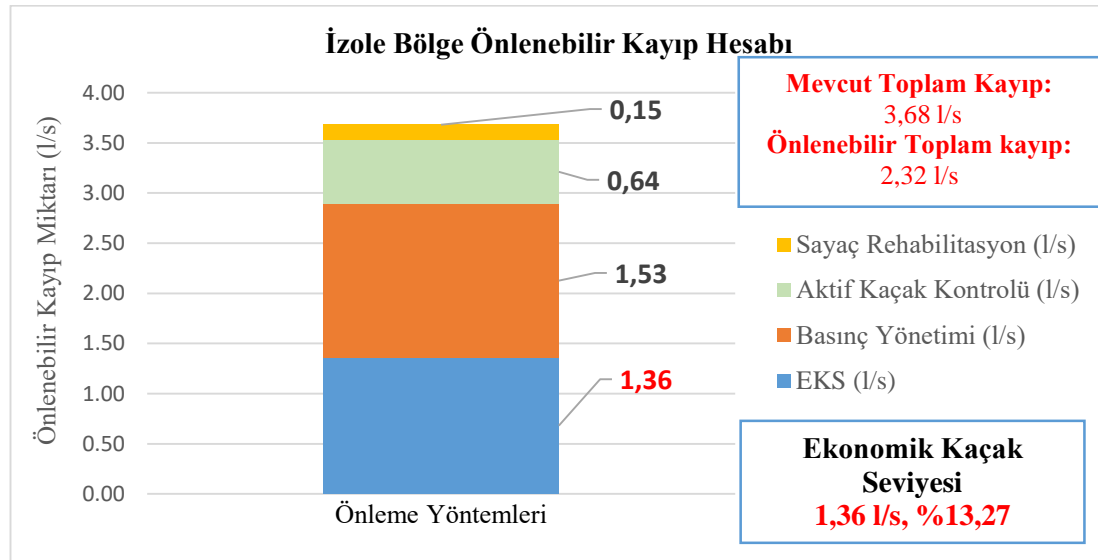
Bileşen	Birim	Şebeke İlk Değeri	Şebeke En Uygun Seviye
Kayıp Miktarı	l/s	3,68	1,36
Kayıp Oranı	%	36,01	13,27

Çizelgede verilen sızıntı miktarının ilk değeri DMA1'deki mevcut koşullarda hesaplanan değeri ifade etmektedir. Bu değer hesaplanmasında standart su dengesi tablosu esas alınmıştır. Bu değer hesaplanması için idarede abone bilgi yönetimi sistemi (ABYS) veri tabanından yasal abone tüketimleri, SCADA sisteminden sistem girişi hacmi, abone dairesinden kaçak kullanımlar ve sayaç hatalarından kaynaklanan kayıplar temin edilmiştir. Çizelgede önlenebilir sızıntı parametresi ise optimizasyon tabanlı EKS modeli tarafından şebeke özellikleri ve sistemin mevcut sızıntı oranı gibi değişkenleri dikkate alarak ekonomik olarak azaltılabilir seviyeyi temsil etmektedir. Yani bu bölgede sızıntılar bu seviyeye kadar ekonomik olarak azaltılabileceğini ifade etmektedir. Böylelikle sistem için ekonomik önlenebilir sızıntı seviyesi ve hacmi 1,36 l/s, yüzde olarak %13,27 olarak hesaplanmıştır. Söz konusu sistemde optimum değere ulaşmak için gereken çalışmalarda belirlenmiştir. Bu kapsamda hesaplanan değerler Çizelge 7'de gösterilmektedir.

Çizelge 7. İzole bölge için önlenebilir sızıntı oranları*Table 7. Recoverable leakage rates for the isolated area*

Yöntem	Birim	Optimizasyon Sonucu
Basınç Yönetimi	l/s	1,53
Aktif Kaçak Yöntemi	l/s	0,64
Ekip Yönetimi	l/s	0,00
	TOPLAM	2,17

Çizelgeden de görüldüğü EKS analizi ile tanımlanan en uygun sızıntı seviyesine ulaşmak için uygulanması gereken yöntemler belirlenmiştir. Bu yöntemlerin uygulanmasına bağlı olarak azaltılabilecek sızıntı oranları da hesaplanmıştır. Çizelgede verilen bu değerler optimizasyon tabanlı EKS modeli çalıştırılarak elde edilmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde sistemin kayıp miktarı 3,53 l/s'den, kayıp azaltma yöntemleri ile 2,17 l/s sisteme kazandırılabilirliği görülmektedir. Ekip sayısı optimal seviyede olduğu için bu yöntemle sisteme ekonomik olarak getirilebilecek su bulunmamaktadır.



Şekil 2. Pilot Bölgede Analiz Sonuçları

Figure 2. Analysis Results in the Pilot Region

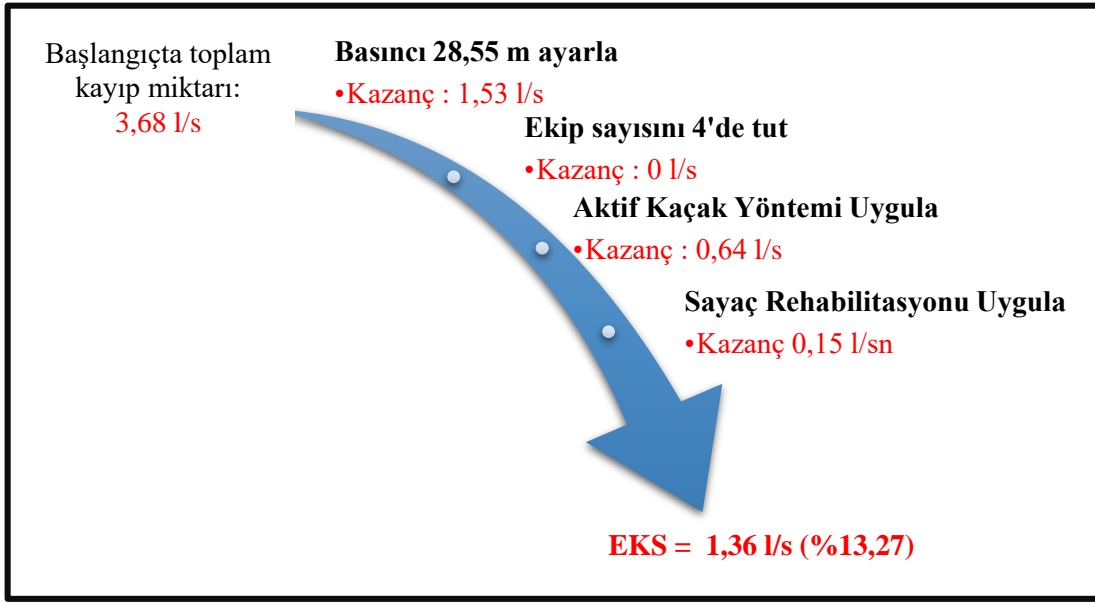
Bölgede başlangıçta (mevcut koşullarda) kayıp miktarı 3,68 l/s olarak hesaplanmıştır. Şekil 2 incelendiğinde, bölgede mevcut şebeke özellikleri dikkate alınarak ekonomik olarak azaltılabilecek kayıp miktarı 2,32 l/s olarak belirlenmiştir. Bu kayıp, sızıntıları ve sayaç hatalarından kaynaklanan idari kayıpları içermektedir. Bölgede ekonomik olarak azaltılabilecek sızıntı miktarı ise 2,17 l/s olarak hesaplanmıştır. Buna göre başlangıçta 3,68 l/s olan kayıp miktarı bölgede sayaç rehabilitasyonu, aktif kaçak kontrolü ve basınç yönetiminin uygulanmasına bağlı olarak ekonomik olarak en fazla 1,36 l/s seviyesine azaltılabilir. Bilindiği üzere bir bölgede kayıpları sıfır (0) seviyesine indirmek mümkün değildir ve en önemlisi ekonomik değildir. Bu nedenle bu bölgede ekonomik ölçütler dikkate alınarak kayıplar en azla 1,36 l/s seviyesine indirilebilir.

Çalışma sonucunda kayıp azaltma çalışmalarında ilgili su idaresinin izleyeceği yol şu şekildedir (Şekil 3);

Adım 1: Bölgenin ortalama basıncı 60 m'den 28,55m'ye düşürülmelidir. (1,53 l/s su sisteme ilave edilecektir)

Adım 2: Aktif sızıntı yöntemi ile sisteme 0,64 l/s su ilave edilene kadar çalışma yapılabilir. Bu miktarın üzerindeki suyu sisteme getirmek artık ekonomik olmayacağından bu değer üst limit olarak alınmalıdır.

Adım 3: Alandaki arıza ekip sayısı korunmalıdır.



Şekil 3. Ekonomik önlenebilir sızıntı oranları
Figure 3. Economically recoverable leak rates

Şekil 3 incelendiğinde optimizasyon EKS modeli ile belirlenen en uygun seviyeye (%13,27 veya 1,36 l/s) ulaşmak için uygulanması gereken yöntemler sıralanmıştır. Buna göre bölgede en fazla faydanın basınç yönetiminin uygulanması ile elde edilecektir. Bölgede optimizasyon algoritması ile belirlenen en uygun basınç seviyesi (28,55 m) için ekonomik olarak azaltılabilecek kayıp 1,53 l/s olarak elde edilmiştir. Diğer taraftan idarede mevcut koşullarda sızıntıların yönetilmesi için ekip sayısının yeterli olduğu ve ekip sayısının daha fazla artırılmasının ekonomik olmayacağı görülmüştür. Buna göre idarede ekip sayısı mevcut sayıda (4) ile sabit tutulması durumunda bile ekonomik olarak azaltılabilecek kayıp değeri 0 belirlenmiştir. Ayrıca bölgede aktif kaçak kontrolünün uygulanması önerilmiş bu yöntem ile ekonomik olarak azaltılabilecek kayıp miktarı 0,64 l/s olarak tespit edilmiştir. Son olarak optimizasyon modeli idari kayıpların azaltılması için sayaç rehabilitasyonu yönetiminin uygulanmasını önermiştir. Bu yöntemin uygulanmasına bağlı olarak bölgede 0,15 l/s'lik kayıp ekonomik olarak azaltılabilir. Bu sonuçlara göre bölgede kayıpların ekonomik olarak azaltılabileceği seviye tanımlanmış ve bu seviyeye ulaşmak için uygulanması gereken yöntemler optimizasyon modeli ile belirlenmiştir.

Haider ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada EKS analiz yapısı önerilmiş ve ALC yönteminin uygulanması durumu için test yapılmıştır. Çalışmada, EKS analiz sonuçlarına göre ALC yönteminin uygulanmasına bağlı olarak su kayıp oranının %43 oranında ve alt yapı sızıntı indeksinin 20'den 7,28'e ekonomik olarak azaltılabileceği ifade edilmiştir. Benzer şekilde Moslehi ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada EKS analizi için önerilen metodoloji saha verilerine göre test edilmiş ve EKS değerini birim servis bağlantı başına kayıp oranı şeklinde hesaplamıştır. Şebekenin özelliğine göre ALC ve basınç yönetiminin uygulanmasına bağlı olarak EKS değeri 27 m³/bağlantı/yıl olarak belirlenmiştir. Literatürdeki çalışmalardan da görüldüğü gibi bir sistemde EKS değeri şebekenin mevcut özelliklerine bağlı olarak sisteme analiz edilmekte ve her bir sistem özgün bir şekilde belirlenmektedir. Ayrıca EKS değerine ulaşmak için uygulanması gereken yöntemlerin yine şebeke koşullarına uygun olarak önerilmektedir.

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, izole bölgede sızıntıların en ekonomik bir şekilde yönetilmesi için yol haritası sunulmuştur. Bu yol haritası esas alınarak uygulanması gereken yöntemler ve bunlardan elde edilecek potansiyel faydalar sıralanmaktadır. Bu çalışmada önerilen yaklaşımın özellikle sahada karar vericiler için referans oluşturacağı düşünülmektedir.

SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada, sürdürülebilir içme suyu dağıtım sisteminin bileşenlerini, gereksinimlerini ve maliyet bileşenlerini dikkate alarak en uygun basınç seviyesini ve ekip sayısını belirlemek ve önlenebilir sızıntı hacmini tanımlamak için optimizasyona dayalı yeni bir model geliştirilmiştir. İlk olarak, optimum önlenebilir sızıntı hacmini hesaplamak için kayıpları ve maliyetleri etkileyen tüm değişkenler ve yapılar belirlenmiştir. Daha sonra bu bileşenlerin hesaplanması için gerekli altyapı oluşturulmuş ve tüm ortak değişkenlerin aynı anda çalışması sağlanmıştır. Elde edilen tüm yapılar Matlab ortamına aktarılmış ve EKS analizinde kullanılan tüm sistem ve yönlendirme kısıtlamalarını dikkate alabilen, Matlab ortamında uzman bir sistem olarak hareket eden algoritmik bir yapı geliştirilmiştir. Uzman sistem sonucunda, EKS değerinin hesaplanmasında şebeke basıncının ve arıza ekip sayısının optimize edilmesi gerektiği bilindiğinden, bu iki değer, hesaplama karmaşıklığı az olan ve önerilen uzman sistemle aynı anda çalışabilen gelişmiş bir optimizasyon algoritması tarafından optimize edilmiştir. Önerilen yapıların gerçek zamanlı çalışabilirliğini göstermek için KASKİ veri tabanından elde edilen veriler, ilgili uzman sisteme ve algoritmik yapıya uygulanmıştır. Sistem için hesaplanan optimal değerlerde basıncın 60 m'den 28,55m'ye düşürülmesi gerektiği hesaplanmış ve örnek sistem için ekip sayısı 4 olarak hesaplanmıştır. Böylece sistem için EKS hacim olarak 1,56 l/s ve yüzde olarak %13,27 olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, önerilen yeni uzman sistem ve optimizasyon algoritması, su dağıtım sistemleri için önlenebilir sızıntı hacmini hesaplamak için sistemde yapılması gerekenleri kolayca belirleyebilir ve idareye önerilerde bulunabilmektedir. Her ölçekte su kayıp yönetiminin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi önerilen algoritmalar ile mümkün olmaktadır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi, (İÜ-BAP FDK-2020-2053) tarafından desteklenmiştir.





KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Ahopelto, S., & Vahala, R. 2020. "Cost-Benefit Analysis of Leakage Reduction Methods in Water Supply Networks". *Water*, 12 (1), 195.
- AL-Washali, T., Sharma, S., Lupoja, R., AL-Nozaily, F., Haidera, M., & Kennedy, M. 2020. "Assessment of water losses in distribution networks: Methods, applications, uncertainties, and implications in intermittent supply". *Resources, Conservation and Recycling*, 152, 104515.
- Alvisi, S., Luciani, C., & Franchini, M. 2019. "Using water consumption smart metering for water loss assessment in a DMA: a case study". *Urban Water Journal.*, 18 (1), 77–83.
- Creaco, E. & Haidar, H. 2019. "Multiobjective Optimization of Control Valve Installation and DMA Creation for Reducing Leakage in Water Distribution Networks". *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145 (10).
- Amoatey, P., Minke, R., & Steinmetz, H. 2018. "Leakage estimation in developing country water networks based on water balance, minimum night flow and component analysis methods". *Water Practice and Technology*, 13, 96–105.
- Al-Washali, T., Sharma, S., Al-Nozaily, F., Haidera, M., & Kennedy, M. 2019. "Modelling the leakage rate and reduction using minimum night flow analysis in an intermittent supply system". *Water*, 11 (48).
- Ezbakhe, F. ve Foguet, A. 2019. "Embracing data uncertainty in water decision-making: an application to evaluate water supply and sewerage in Spain". *Water Supply*, 19 (3), 778–788.
- Farley, M. & Trow, S. 2003. "Losses in Distribution Networks". *In: An examination of the benefits of leak detection*. ISBN 1 900222 11 6.
- Farley, M. & Lemberger, R. 2005. "Developing a non-revenue water reduction strategy: planning and implementing the strategy." *Water Science and Technology: Water Supply.*, 15 (1), 41–50.
- Haider, H., Al-Salamah, I.S., Ghazaw, Y.M., Abdel-Maguid, R.H., Shafiquzzaman, M., & Ghumman, A.R. 2019. "Framework to establish economic level of leakage for intermittent water supplies in arid

- environments". *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145 (2), 1–12.
- Islam, M.S. ve Babel, M.S. 2013. "Economic analysis of leakage in the Bangkok water distribution system. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139 (2), 209–216.
- Jensen, O. & Nair, S. (2019). "Integrated Urban Water Management and Water Security: A Comparison of Singapore and Hong Kong". *Water*, 11 (4), 785.
- Lakehal, A. & Laouacheria, F. 2017. "Reliability based rehabilitation of water distribution networks by means of Bayesian networks." *Journal of Water and Land Development*, 34 (1), 163–172.
- Lambert, A.O. (2002). "International report: water losses management and techniques." *Water Science and Technology: Water Supply*, 2 (4), 1–20.
- Lim, E., Savic, D., & Kapelan, Z. 2015. "Development of a leakage target setting approach for South Korea based on Economic Level of Leakage". *Procedia Engineering*, 119 (1), 120–129.
- Liu, J. & Lansley, K.E. 2020. "Multiphase DMA Design Methodology Based on Graph Theory and Many-Objective Optimization". *Journal of Water Resources Planning and Management*, 146 (8).
- Molinos-Senante, M., Mocholí-Arce, M., & Sala-Garrido, R. 2016. "Estimating the environmental and resource costs of leakage in water distribution systems: A shadow price approach". *Science of the Total Environment*, 568, 180–188.
- Moslehi, I., Jalili Ghazizadeh, M.R., & Yousefie Khoshghalb, E. 2019. "Economic analysis of pressure management in water distribution networks". *Journal of Water and Wastewater*, 31 (2), 100–117.
- Negharchi, S. & Shafaghat, R. 2020. "Leakage estimation in water networks based on the BABE and MNF analyses: a case study in Gavankola village, Iran". *Water Supply*, 1.
- Salehi, S., Ghazizadeh, J., ve Tabesh, M. 2017. "A comprehensive criteria-based multi-attribute decision-making model for rehabilitation of water distribution systems". *Journal Structure and Infrastructure Engineering*, 14 (6), 743–765.
- Lopez, S.T., Barrionuevo, M., & Labajos, B. 2019. "Water accounts in decision-making processes of urban water management: Benefits, limitations and implications in a real implementation". *Sustainable Cities and Society*, 50.
- Wyatt, A.S. & Alshafey, M. 2012. "Non-revenue water: financial model for optimal management in developing countries". *Water Science & Technology: Water Supply*, 12 (4), 451–463.
- Yılmaz, S. (2021). Su Kayıp Yönetiminde Ekonomik Kaçak Seviyesinin Optimizasyon Algoritmalarıyla Belirlenmesi. Doktora Tezi. İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yılmaz, S., Fırat, M., Özdemir, Ö., Ateş, A. 2021. "Su Kayıp Yönetiminde İzole Bölge Tasarımı ve Aktif Kaçak Kontrolünün Ekonomik Analizleri İçin Hesaplama Aracının Geliştirilmesi". *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 9(2): 467-478.



ZEYTİN YAPRAĞINDAKİ HASTALIKLARIN SINIFLANDIRILMASINDA ÖN EĞİTİMLİ EVRIŞİMLİ SİNİR AĞLARININ PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

¹Bünyamin DİKİCİ , ²Mehmet Fatih BEKÇİOĞULLARI , ³Hakan AÇIKGÖZ ,
⁴Deniz KORKMAZ 

^{1,2,3}Gaziantep İslam Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik
Mühendisliği Bölümü, Gaziantep, TÜRKİYE

⁴Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Bölümü, Malatya, TÜRKİYE

¹bunyamin.dikici@gibtu.edu.tr, ²mehmetfatih.bekciogullari@gibtu.edu.tr, ³hakan.acikgoz@gibtu.edu.tr,

⁴deniz.korkmaz@ozal.edu.tr

ÖZ: Zeytin ülkemizin belirli bölgelerinde yetişen oldukça önemli bir üründür. Gümrük ve Ticaret Bakanlığı'nun verilerine göre 2019 yılında yaklaşık 420 bin ton sofralık zeytin üretimi ile dünyadaki toplam üretimin %14'ten fazlası ülkemizde yapılmıştır. Böylece, zeytin yaprağındaki hastalıkların erken teşhisi ve tedavisi üretim kapasitesinin artmasına yol açabilir. Günümüzde birçok alanda olduğu gibi bitki hastalıklarının teşhisi için derin öğrenme algoritmaları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, AlexNet, SqueezeNet, ShuffleNet ve GoogleNet gibi sıklıkla tercih edilen ön eğitilmiş derin öğrenme ağları ile zeytin yaprağındaki hastalıkların sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. Ağ yapıları, zeytin yaprağındaki hastalıkların etiketlerine göre eğitim için yeniden düzenlenmiştir. Veri setinde, veri çoğaltma işlemi uygulanarak hem ham veri seti hem de çoğaltılmış veri seti için ayrı ayrı performans sonuçları alınmıştır. Elde edilen sonuçlar doğruluk, duyarlılık, özgüllük, kesinlik ve F1-Skor gibi performans ölçütleri ile değerlendirilmiştir. En iyi performans iyileştirmesi %7,56 ile AlexNet'in doğruluk değeri için elde edilirken, en düşük iyileştirme oranı %0,63 ile ShuffleNet'in özgüllük değerinden elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ön-eğitilmiş ağlar, Derin öğrenme, Hastalık sınıflandırma, Zeytin yaprağı

Performance Investigation of Pre-Trained Convolutional Neural Networks in Olive Leaf Disease Classification

ABSTRACT: Olive is a very significant crop grown in specific regions of our country. According to the data of the Ministry of Customs and Trade, with the production of approximately 420 thousand tons of table olives in 2019, more than 14% of the total production in the world was made in Turkey. Therefore, early diagnosis and treatment of diseases in olive leaves can lead to increased production capacity. Today, as in many fields, deep learning algorithms are widely used for the diagnosis of plant diseases. In this study, the classification of olive leaf diseases was carried out with the frequently preferred pre-trained deep learning networks such as AlexNet, SqueezeNet, ShuffleNet, and GoogleNet. In the data set, performance results were obtained for both the raw data set and the augmented data set by applying the data augmentation process. The obtained results were evaluated with the performance criteria as accuracy, sensitivity, specificity, precision, and F1-Score. While the best performance improvement was obtained for the accuracy value of AlexNet with 7.56%, the lowest improvement rate was obtained from the specificity value of ShuffleNet with 0.63%.

Keywords: Pre-trained networks, Deep learning, Disease classification, Olive leaf

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Modern tarımsal teknolojiyle birlikte sınırlı miktarda olan tarımsal araziler ve su kaynakları 7 milyarı aşkın dünya nüfusuna yetecek yemek ihtiyacını karşılayabilmektedir (Mohanty ve diğ., 2016). Ancak, bu kaynakların bilinçsizce kullanılan kimyasal gübrelere ve zirai ilaçlara maruz kalması kirliliğe sebep olmaktadır. Bundan dolayı tarımsal üretimde elde edilen ürün kalitesi ile birlikte verim de azalmaktadır. Öte yandan, her geçen gün artan insan nüfusu ile orantılı olarak gıda ihtiyacı da artmaktadır. Bu yönüyle tarım konusu ülkelerin kendi ihtiyaçlarını karşılamada yeterliliği konusunda stratejik olarak önemli bir yere gelmiştir. Nitekim tarımsal üretimde verimliliği düşürdüğü bilinen zirai hastalıklar ile mücadelede günümüz teknolojisinin daha etkin kullanılması ürün verimliliğini pozitif yönde etkileyeceği düşünülmektedir. Bitkilerde görülen hastalıkların erken tespitinin yapılması ile yeterli miktarda ve etkin bir şekilde zirai ilaçlama programlarının yapılmasının önünü açacaktır. Bu durumun çevre kirliliğinin önüne geçilmesine ve ürün verimliliğinin artırılmasında olumlu katkı sağlaması düşünülmektedir.

Zeytin, ülkemizin özellikle batısında ve güneyinde önemli bir alanda yetiştirilmektedir (Erilmez ve Erkan, 2014). Bu bitkinin üretimini negatif yönde etkileyen bazı zirai hastalıkların teşhisinin erken ve ekonomik olarak yapılması gerekmektedir. Zeytin yaprağından hastalığın erken teşhisi ile ürün kalitesinin ve verimin artırılması hedeflenmektedir. Ülkemizin potansiyeli de göz önüne alındığında ilerleyen yıllarda bu alanda üretimde atılım yapabilmesi ve ekonomiye daha çok katkı sağlaması olasıdır.

Son yıllarda bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte bitki hastalıkları teşhisinde derin öğrenme tabanlı birçok çalışma yapılmıştır. Uğuz ve Uysal çalışmalarında zeytin yaprağı hastalığının sınıflandırılması için evrişimli sinir ağı (ESA) tabanlı bir model önermişlerdir. Türkiye’de zeytin bitkisinde yaygın olarak görülen iki ayrı hastalıklı yapraklardan oluşan görüntüler ile sağlıklı görüntülerin toplanmasıyla veri seti oluşturmuşlardır. Önerilen model VGG-16 ve VGG-19 yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen görüntülere uygulanan farklı veri artırımı yöntemlerinin sınıflandırma performansına olumlu etki ettiği vurgulanmıştır. Ayrıca bu çalışmada farklı kayıp fonksiyon optimizasyon yöntemlerinin sınıflandırma sonucuna etkisi deneysel sonuçlar ile gösterilmiştir. Performans değerlendirme ölçütlerine göre önerilen model karşılaştırma yöntemlerine göre daha üstün sınıflandırma performansı göstermiştir (Uğuz ve Uysal, 2020). Uysal çalışmasında zeytin yaprağının üç farklı hastalığını önerdikleri ESA tabanlı bir yöntem ile sınıflandırmışlardır. Farklı optimizasyon algoritmaları ile farklı iterasyon sayılarının sınıflandırmaya etkisi araştırılmıştır. Yapılan tez çalışmasında veri artırımı işlemi uygulandığında önerilen modelin en iyi sınıflandırma performansı sergilediği deneysel sonuçlar ile gösterilmiştir (Uysal, 2020). Korkut ve arkadaşları çalışmalarında bitki yapraklarındaki hastalığın tespiti için destek vektör makinası (DVM) tabanlı bir makine öğrenmesi yöntemi kullanmışlardır. Birçok bitkinin hastalıklı ve sağlıklı fotoğraflarından veri seti oluşturulmuştur. Oluşturulan veri setinin özellik çıkarımı yapılmıştır. Daha sonra önerilen modelden ve karşılaştırma metodu olarak kullanılan farklı yöntemlerden sağlıklı ve hastalıklı olmak üzere iki kategoride sınıflandırma işlemi yapılmıştır. Sınıflandırma problemlerinde yaygın olarak kullanılan performans metrik değerlendirme sonuçlarına göre önerilen makine öğrenmesi modeli ve karşılaştırma metodlarından bir tanesi olan lojistik regresyon algoritması iyi sonuçlar vermiştir (Korkut ve diğ., 2018). Liu ve arkadaşları çalışmalarında elma yaprağının dört farklı hastalığı için sınıflandırma konusunda ESA tabanlı bir yöntem önermişlerdir. Oluşturdukları veri setini artırmak için elde ettikleri fotoğrafları 90 ile 270 derece arasında döndürerek üç kat artırmışlardır. Önerdikleri modelin sınıflandırma performansı farklı makine öğrenmesi ve derin öğrenme metodları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen performans değerlendirme sonuçları sınıflandırma konusunda önerilen derin öğrenme modelinin karşılaştırma metodlarından daha üstün olduğunu ortaya koymuştur (Liu ve diğ., 2018). Türkoğlu ve arkadaşları çalışmalarında çoğunlukla Malatya ili ve çevresinde rastlanan kayısı meyvelerinde bulunan hastalıkların sınıflandırılması amacıyla ESA tabanlı bir derin öğrenme metodu önermişlerdir. Kayısı meyvesinde yaygın olarak görüldüğü belirtilen dört farklı hastalık ile veri seti oluşturulmuştur. 18 katman ve çeşitli evrişim filtrelerinden oluşan önerilen ESA modeli ile deneysel sonuçlar alınmıştır. Ayrıca sınıflandırma problemleri konusunda yaygın olarak kullanılan AlexNet ve SqueezeNet gibi ESA temelli modeller karşılaştırma yöntemleri olarak kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar önerilen derin öğrenme modelinin

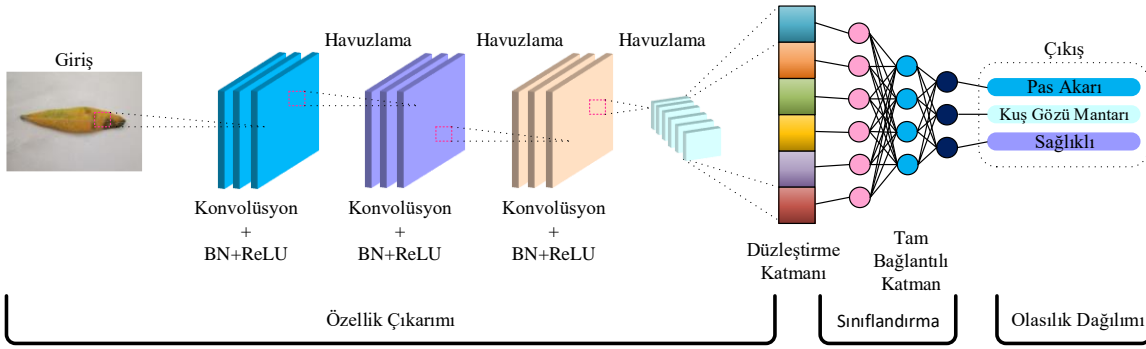
kayıp hastalıklarının sınıflandırılmasında daha üstün başarı sağladığı belirtilmiştir (Türkoğlu ve diğ., 2020). Geetharamani ve Pandian çalışmalarında domates, patates ve kiraz gibi 39 farklı bitkilerin hastalıklı ve sağlıklı yapraklarından elde ettikleri veri setinin sınıflandırılmasında dokuz katmanlı olarak geliştirdikleri ESA modelini önermişlerdir. Veri setinde görüntülerin artırılması için ise altı farklı yöntem uygulanmıştır. Yapılan çalışmada sağlıklı ve hastalıklı olmaz üzere iki sınıflandırma bulunmaktadır. Makine öğrenmesi temelli modeller karşılaştırma yöntemleri olarak kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar veri artırma yönteminin sınıflandırma problemi sonuçlarına pozitif yönde etki ettiğini göstermiştir. Ayrıca önerilen modelin bu problemin çözümünde makine öğrenmesi temelli sınıflandırma yöntemlerinden çok daha üstün olduğunu göstermiştir (Geetharamani ve ArunPandian, 2019). Upadhyay ve Kumar çalışmalarında çeltik bitkisinin yapraklarında görülen hastalıkların sınıflandırılması amacıyla derin öğrenme tabanlı bir ESA yöntemi önerilmiştir. Veri seti olarak sağlıklı çeltik yaprakları ve üç ayrı hastalıklı yaprakların görüntüleri toplanmıştır. Dört ayrı sınıftan oluşan problemin çözümünde önerilen yöntemin başarılı olduğu performans metrik sonuçları ile ortaya konulmuştur (Upadhyay ve Kumar, 2021). Jadhav ve arkadaşları çalışmalarında bezelye bitkisinin yapraklarında görülen hastalıkların sınıflandırılmasında derin öğrenme tabanlı önceden eğitilmiş modeller olan AlexNet ve GoogleNet modellerini önermişlerdir. Üç farklı hastalık ile sağlıklı yaprak görüntülerinden oluşan veri seti toplanmıştır. Deneysel çalışmalar önerilen derin öğrenme modellerinin makine öğrenmesi modellerinden daha üstün sınıflandırma performansı gösterdiği belirtilmiştir (Jadhav ve diğ., 2021). Pawar ve arkadaşları çalışmalarında salatalık bitkisinin yapraklarında görülen hastalıklarında sınıflandırılmasında yapay sinir ağı (YSA) tabanlı bir yöntem önermişlerdir. Salatalık yapraklarında görülen iki farklı hastalık ile sağlıklı yapraklardan elde ettikleri görüntüler ile veri seti oluşturulmuştur. Görüntülere özellik çıkarma uygulanmıştır. Öncelikle önerilen modelin test aşamasında yaprağın hastalıklı veya sağlıklı olduğuna karar verdiği belirtilmiştir. Eğer yaprak sağlıklı değil ise hastalığının sınıflandırılmasının yapıldığı ikinci aşama bulunmaktadır. Performans değerlendirme sonuçlarına göre önerilen model salatalık yapraklarının sınıflandırılmasında %80.45 doğruluk başarıları göstermiştir (Pawar ve diğ., 2016).

Bu çalışmada, zeytin yaprağındaki hastalıkların teşhisi ve sınıflandırılması için derin öğrenme algoritmalarının performansları incelenmiştir. Ağ yapıları için literatürde sıklıkla kullanılan ön eğitimli AlexNet, GoogleNet, ShuffleNet ve SqueezeNet ağları seçilmiştir. Çalışmalarda zeytin yaprağındaki hastalıkları kapsayan halka açık bir veri seti kullanılmıştır. Veri setindeki görüntü sayısının az olmasından dolayı ağ performanslarını artırmak için orijinal veri setinde veri çoğaltma işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, deneysel çalışmalar için eğitim ve test verileri hazırlanmıştır. Ön eğitimli derin öğrenme yöntemlerinin her biri için deneysel çalışmalar yapılarak sonuçlar performans değerlendirme ölçütleri ile analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında ön eğitimli derin öğrenme yöntemlerinin performansları değerlendirilmiş ve en iyi sınıflandırıcı ağ yapısı belirlenmiştir.

Çalışmanın diğer kısımları ise şu şekilde organize edilmiştir. Ön eğitimli derin öğrenme yöntemlerinin genel özellikleri 2. kısımda detaylı bir şekilde sunulmuştur. 3. kısımda veri çoğaltma işlemi hakkında genel bilgiler verilmiştir. 4. kısımda deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ise 5. kısımda değerlendirilmiştir.

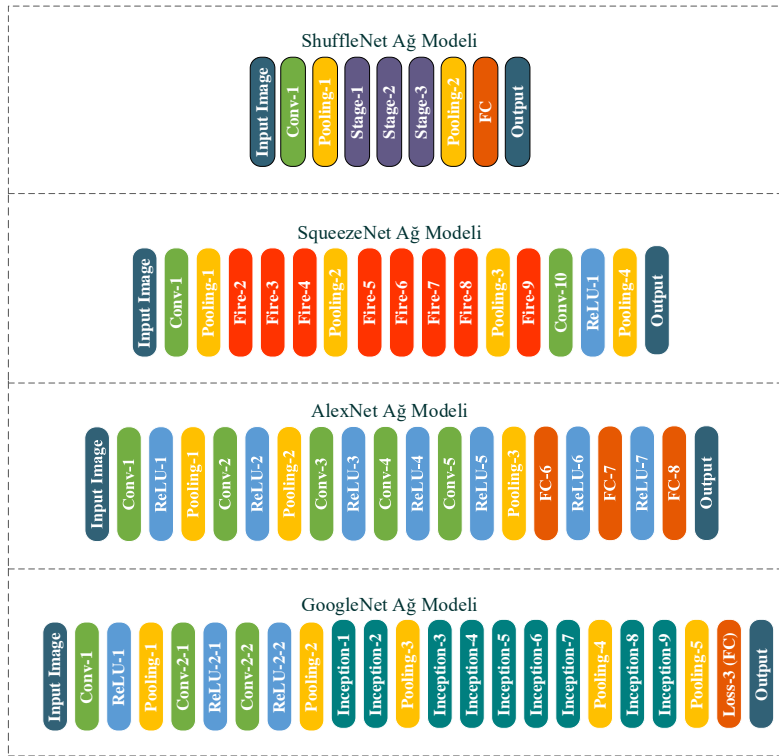
EVRIŞİMLİ SİNİR AĞLARININ ÖZELLİKLERİ (FEATURES OF CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS)

Yapay zekânın alt kolu olarak görülen derin öğrenme günümüzde oldukça önemli bir yere sahiptir. Yapay zekâ kışı olarak adlandırılan ve yapay zekânın üzerindeki ilgisini kaybettiği dönemlerden sonra, gelişen teknoloji ve veri sayısının artmasıyla 2010'lu yılların başında tekrar oldukça popüler bir hal almaya başlamıştır (Floridi, 2020). Bu ilginin en büyük etkenlerinden biri ise oldukça başarılı performans sonuçları veren ESA modelleridir. ESA yapıları, en az bir katmanında matematiksel bir işlem olan konvolüsyonun kullanıldığı çok katmanlı bir YSA olarak ele alınabilir. Konvolüsyon katmanının dışında doğrusal olmayan, havuzlama, düzleştirme katmanları ve son olarak YSA ile aynı işleve sahip olan tam bağlantılı katman bulunmaktadır (Albawi ve diğ., 2017). Şekil 1'de örnek bir ESA yapısı gösterilmiştir.



Şekil 1: Evrişimli sinir ağına ait mimari

Figure 1: An architecture of convolutional neural network



Şekil 2: Ön-ēitilmiş evrişimli sinir ağlarının katmanları

Figure 2: Layers of pre-trained convolutional neural network

Özellik çıkarımı için konvolüsyon ve havuzlama katmanları kullanılmaktadır. Bu kısımda kullanılan filtreler yardımıyla görüntüye ait önemli bilgiler içeren pikseller ön plana çıkarılarak görüntüdeki gereksiz bilgiler atılmaktadır. Seçilen filtrelerin giriş resmini yatayda ve dikeyde tamamen taraması sonucunda özellik haritası ortaya çıkmaktadır. Havuzlama katmanında da yine boyutsal bir azalma söz konusudur. Bu sayede parametre sayısı ve hesaplama maliyeti azaltılabilir. Maksimum havuzlama en sık tercih edilen havuzlama metodudur (O'Shea ve Nash, 2015).

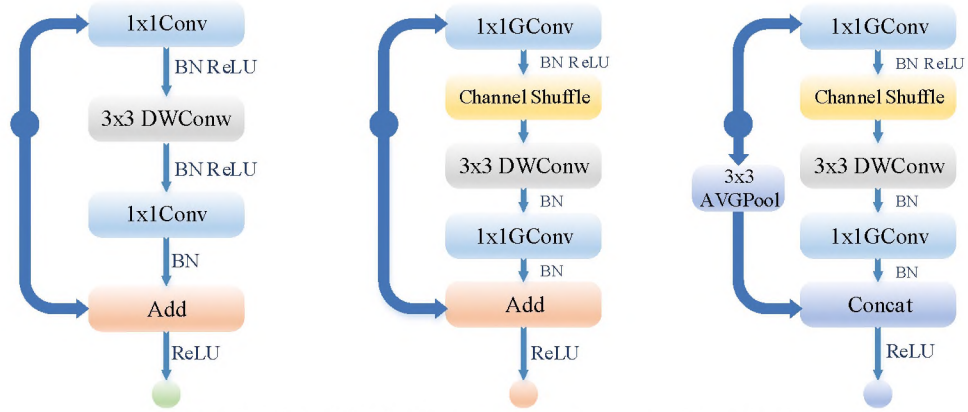
2006 yılında oluşturulan, yaklaşık 15 milyon yüksek çözünürlüklü görüntü ve 22 bin sınıf bulduran ImageNet veri seti ile ilk defa 2010'da düzenlenen ImageNet Büyük Ölçekli Görsel Tanıma Yarışması'nda (ILSVRC) kullanılmıştır (Deng ve diğ.,2009). İlk iki yıl kullanılan makine öğrenmesi metodlarının ardından, 2012 yılında AlexNet derin öğrenme ağı kullanılmıştır. AlexNet ile hata oranını yüzde 26'dan yüzde 15'e düşürülmüştür. Bu başarının ardından derin öğrenme modelleri büyük bir ivme ile yükselişe geçmiştir ve ilerleyen yıllarda ShuffleNet, SqueezeNet ve GoogleNet gibi ağlar da yarışmada önemli derecelerde elde etmiştir. Şekil 2'de bu çalışmada kullanılan ShuffleNet, SqueezeNet, AlexNet ve GoogleNet ağlarının katmanları görsel olarak sunulmuştur. Ayrıca, Çizelge 1'de çalışmada kullanılan derin öğrenme modellerinin ağ yapıları verilmiştir.

Çizelge 1: Çalışmada kullanılan ön eğitimli modellerin ağ yapıları

Table 1: Network structures of the pre-trained models used in this study

Method	Giriş Boyutu	Filtre Boyutu	Kaydırma Adımı	Katman Sayısı	Toplam Ağırlık
GoogleNet	224x224	1, 3, 5, 7	1,2	22	7M
ShuffleNet	224x224	3, 7	1,2	50	1.4M
SqueezeNet	227x227	1, 3, 7, 13	1,2	18	1.24M
AlexNet	227x227	3, 5, 11	1,4	8	61M

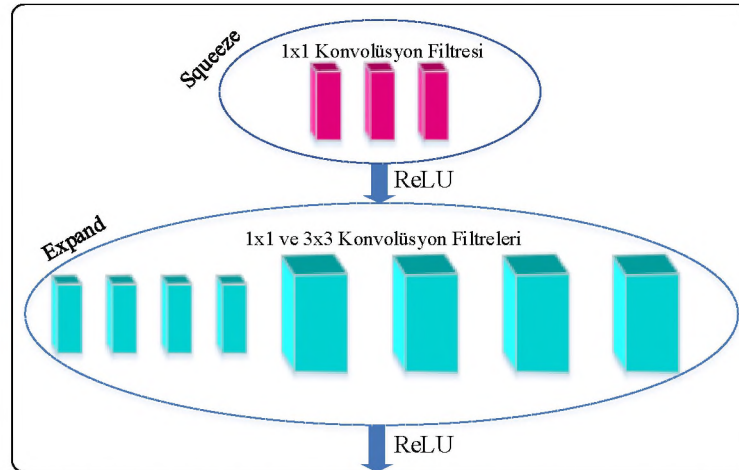
AlexNet, 2012 ILSVRC' de gösterdiği başarı ile ESA'nın yeniden popülerleşmesinde öncü bir rol üstlenmiştir. Bu ağın yapısında beşi konvolüsyon katmanı ve üçü tam bağlantılı katman olmak üzere toplam sekiz adet katman bulunmaktadır. Ayrıca tanh yerine ReLU fonksiyonu kullanarak daha hızlı bir model elde edilmiştir. Kullanılan düğüm seyreltme katmanı sayesinde aşırı öğrenmenin de önüne geçilmiştir. Modelde üç tane de havuzlama katmanı bulunmaktadır. Bu katman için maksimum havuzlama metodu kullanılmıştır (Krizhevsky ve diğ., 2012).



Şekil 3: ShuffleNet'in iç yapısı (Zhang ve diğ., 2018)

Figure 3: Internal structure of ShuffleNet

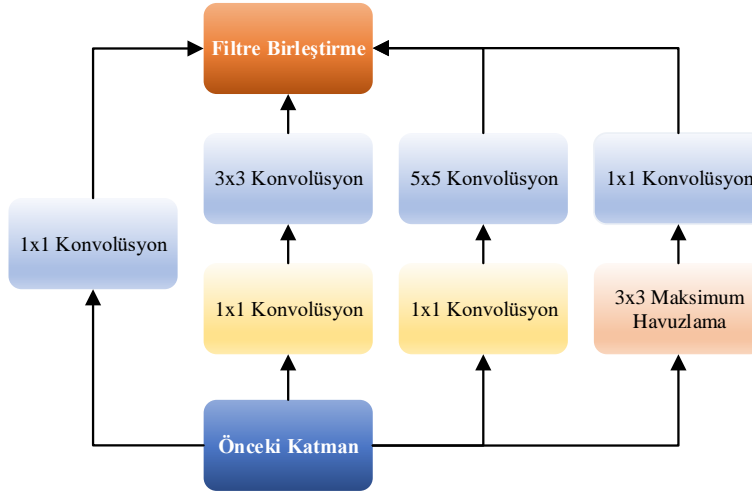
ShuffleNet 2017 yılında sunulmuştur. Bu model elli adet katman içeren dar boğaz yapısına sahip artık bir yapıdır. Diğer modellerle karşılaştırıldığında daha az parametre ve karmaşıklığa sahiptir. Bu sebeple daha çok düşük güçlü mobil cihazlar için de uygun bir model olarak düşünülebilir (Zhang ve diğ., 2018). Şekil 3' de ShuffleNet'in iç yapısı gösterilmiştir.



Şekil 4: SqueezeNet'in fire bölümlerinin genel gösterimi (Iandola ve diğ., 2016)

Figure 4: General view of Fire parts of SqueezeNet

SqueezeNet modeli ise 2016 yılında ortaya çıkmıştır. Bu ağ toplam on sekiz adet katman içermektedir. İlk ve son tabakası konvolüsyon katmanırken sekiz adet de ateşleme (fire) katmanı içermektedir. AlexNet'e kıyasla 50 kat daha küçük toplam ağırlık sayısına ve 31 kat daha yüksek hıza sahiptir. Bu yapı ile küçük ağı modelleri oluşturulabildiğinden, mobil ya da gömülü sistemlere kolaylıkla entegre edilebilmektedir (Iandola ve diğ., 2016). Şekil 4'de, "fire" olarak belirtilen SqueezeNet modelinin içyapısı verilmiştir.



Şekil 5: Başlangıç modülünün içyapısı (Szegedy ve diğ., 2015)


















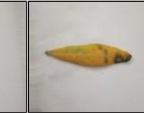
Figure 5: The internal structure of inception module

Çalışmada kullanılan diğer bir ön eğitilmiş derin öğrenme ağı GoogleNet, yirmi iki adet katmana sahiptir. Bu modelde bulunan başlangıç modülleri sebebiyle karmaşık sayılabilecek bir mimariye sahiptir. Başlangıç modülleri sayesinde art arda konvolüsyon ve havuzlama katmanları sıralanıp, onlara filtre uygulanmamıştır. Bunun yerine ağırlıklı olarak birbirine paralel bağlı birkaç katman grubundan oluşmaktadır. Bu sayede hesaplama ve bellek maliyeti aşağı çekilmiştir ve aşırı öğrenmenin de önüne geçilmiştir. 2014 yılında %5,7 hata oranı ile ILSVRC'de oldukça iyi sonuçlar elde etmiştir (Szegedy ve diğ., 2015). Başlangıç modüllerine ait yapı ise Şekil 5'de gösterilmiştir.

VERİ ÇOĞALTMA YAKLAŞIMI (DATA AUGMENTATION APPROACH)

Oluşturulan herhangi bir derin öğrenme modelinin iyi eğitilmesi, bu algoritmalar için oldukça kritik bir öneme sahiptir. Eğitim aşamasının başarılı bir biçimde gerçekleşebilmesi için veri setinin yeterince zengin örneklerle sahip olması gerekmektedir. Veri setindeki görüntü sayısı arttıkça geliştirilen ağ modeli daha iyi eğitilebilecek ve test aşamasında daha yüksek performans sonuçları elde edebilecektir. Öte yandan, veri setindeki sınıflarda eşit sayıda görüntü bulunması genelde mümkün olmamaktadır ve sınıfların sahip olduğu görüntü sayılarında miktar bakımından dengesizlikler olabilir. Ancak, model eğitilirken her sınıf için eşit miktarda görüntü kullanılması da ağın performansını artıran unsurlardan biridir (Buda ve diğ., 2018). Bu sebeple, veri setindeki sınıflar arasındaki dengesizliği gidermek ve daha fazla görüntü verisi elde etmek için veri çoğaltma yöntemi kullanmak oldukça etkili sonuçlar verebilir (Bloice ve diğ., 2017). Bu metod, çevrim içi ya da çevrim dışı olmak üzere iki şekilde uygulanabilmektedir. Çevrim içi olarak uygulandığında elde edilen görüntüler diske kaydedilmezken, çevrim dışı olarak uygulandığında ortaya çıkan görüntüler diske kaydedilmektedir. Ayrıca, çevrim içi veri artırma modeli kullanıldığında, her döngüde farklı görüntüler görülecektir. Çevrim dışında ise, elde edilen görüntüler eğitim setinin bir parçası olacaktır. Bu yüzden görüntüler döngü sayısına bağlı olarak ağ tarafından birçok kez görüntülenecektir (Shorten ve Khoshgoftaar, 2019).

Bu çalışmada çevrim dışı veri çoğaltma metodu kullanılmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, halka açık bir veri seti kullanılmıştır (https://github.com/sinanuguz/CNN_olive_dataset). Orijinal veri setindeki görüntülere; aynalama/yansıtma, bulanıklaştırma, döndürme, kesme-kaydırma işlemleri uygulanarak veri setinin genişletilmesi amacıyla veri çoğaltma yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntem kullanılarak veri setindeki her bir görüntü için beş adet yapay görüntü daha elde edilmiştir. Böylece, başlangıçta 3300 olan görüntü sayısı 16500 adet artırılarak 19800'e çıkarılmıştır. Şekil 6'da her bir sınıftan seçilen örnek görüntü ile çoğaltma yöntemi sonucunda artırılmış görüntüler sunulmuştur.

		VERİ ÇOĞALTMA YÖNTEMLERİ					
		Orijinal Görüntü	Aynalama	Bulanıklaştırma	Döndürme	Soldan Kesme	Sağdan Kesme
HASTALIK	Sağlıklı						
	Pas Akarı						
	Kuş Gözü Mantarı						

Şekil 6: Veri çoğaltma örnekleri

Figure 6: Examples of data augmentation

Sonuç olarak ham veri setine veri çoğaltma işleminin uygulanmasıyla birlikte, miktar olarak altı kat daha büyük bir veri seti elde edilmiştir. Kullanılan modellerin performans sonuçları her iki veri seti için de ayrı ayrı elde edilmiş ve sonuçlar devam eden bölümde sunulmuştur.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Bu bölümde, ön eğitimli ağların, zeytin yaprağındaki hastalıkların teşhisindeki sınıflandırma performanslarını analiz edebilmek için kıyaslama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bunun için doğruluk, duyarlılık, kesinlik, özgüllük ve F1-Skor gibi değerlendirme ölçütleri hata matrisi yardımıyla elde edilmiştir. Doğruluk, doğru tahmin edilen örneklem sayısının veri setindeki tüm örneklem sayısına oranıdır. Duyarlılık, doğru tahmin edilen hastalıklı örneklem sayısının gerçekte hastalıklı olan tüm örneklem sayısına oranıdır. Kesinlik, doğru tahmin edilen hastalıklı örneklem sayısının hastalıklı olarak tahmin edilen toplam örneklem sayısına oranıdır. Özgüllük, doğru tahmin edilen hastalık olmayan örneklem sayısının gerçekte hastalık olmayan tüm örneklem sayısına oranıdır. F1-Skor ise duyarlılık ve kesinlik parametrelerinin ağırlıklı ortalamasıdır. Eğer veri setini oluşturan örneklem dengersiz dağılmış ise tercih edilmektedir. Belirtilen bu değerlendirme ölçütleri aşağıdaki formüllerle ifade edilebilir (Darwish ve diğ., 2019; Deepak ve Ameer,2019).

$$\text{Doğruluk} = \frac{DP+DN}{DP+DN+YP+YN} \quad (1)$$

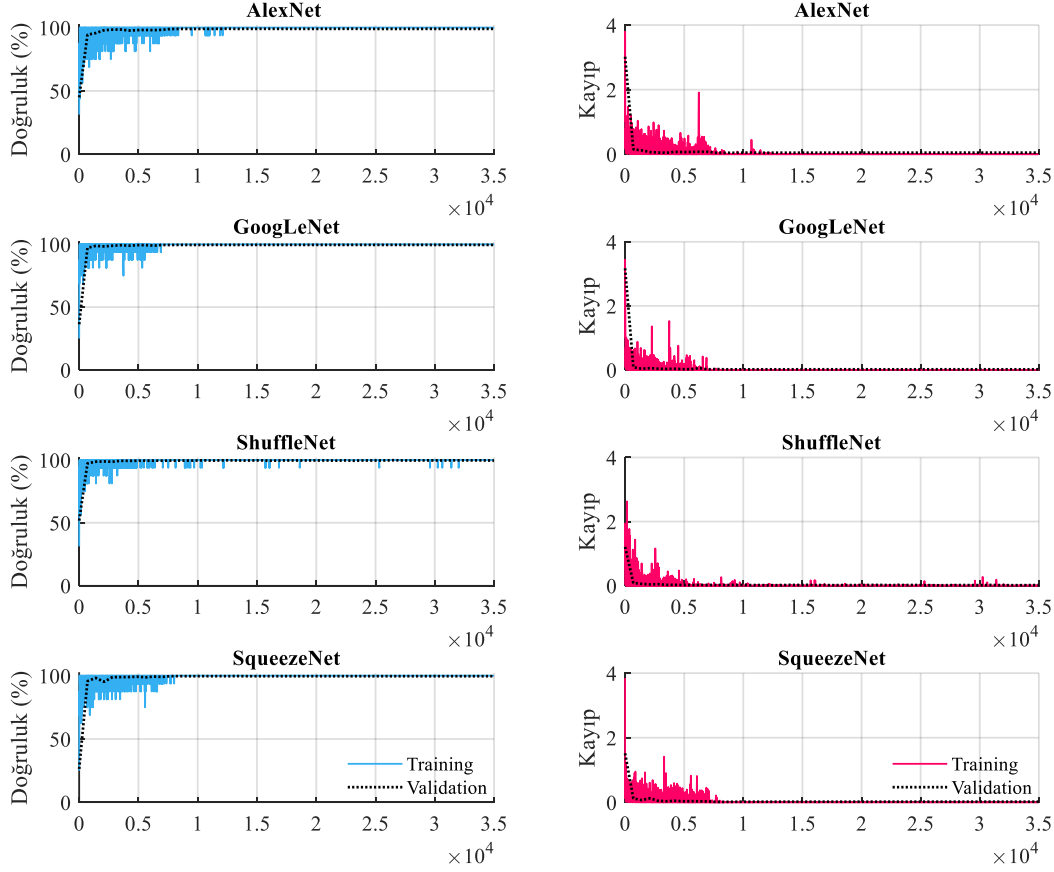
$$\text{Duyarlılık} = \frac{DP}{DP+YN} \quad (2)$$

$$\text{Kesinlik} = \frac{DP}{DP+YP} \quad (3)$$

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

$$F1 - \text{Skor} = 2 * \frac{\text{Duyarlılık} * \text{Kesinlik}}{\text{Duyarlılık} + \text{Kesinlik}} \quad (5)$$

Yukarıda verilen denklemlerde doğru pozitif, doğru negatif, yanlış pozitif ve yanlış negatif DP, DN, YP ve YN olarak simgelenmiştir. DP, gerçekte pozitif sınıfta yer alan ve doğru tahmin edilen sayısı ifade etmektedir. DN, gerçekte negatif sınıfta yer alan ve doğru tahmin edilen sayısı ifade etmektedir. YN, gerçekte pozitif sınıfta yer alan ve yanlış tahmin edilen sayısı ifade etmektedir. YP, gerçekte negatif sınıfta yer alan ve yanlış tahmin edilen sayısı ifade etmektedir.



Şekil 7: Eğitim ve kayıp eğrileri

Figure 7: Training and loss graphs

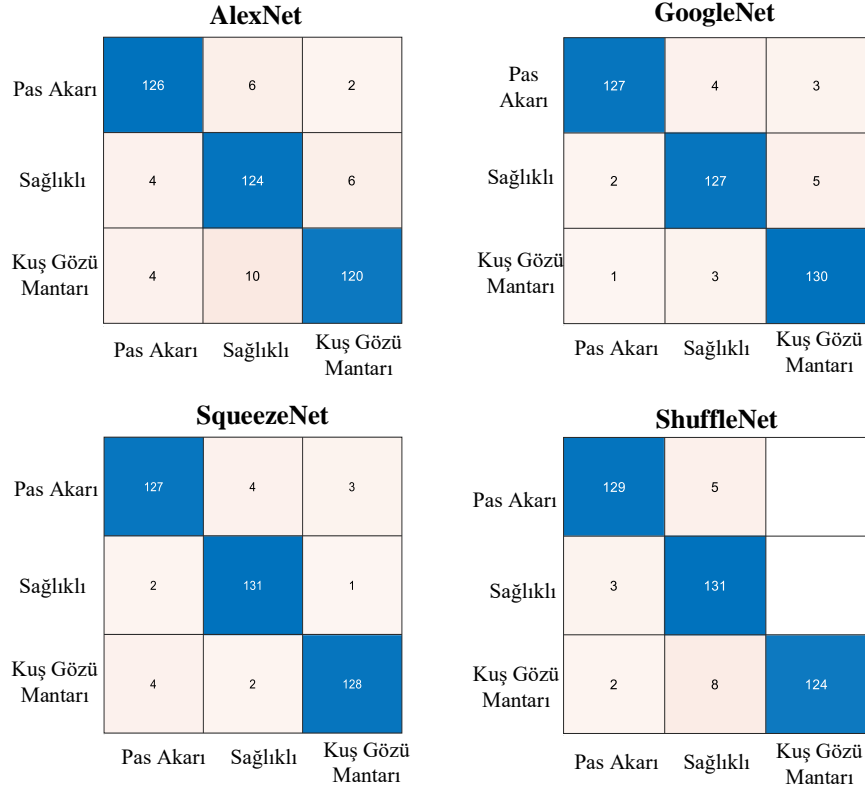
DeneySEL çalışmalar, Intel (R) i7-10750H CPU @2.60 GHz, NVIDIA Quadro P620 GPU ve 16 GB RAM belleğe sahip bir iş istasyonu kullanılarak Matlab R2020a ortamında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, ham veri seti ile çoğaltılmış veri seti analizleri olmak üzere iki kısma ayrılmıştır. İlk olarak ham veri seti üzerinde karşılaştırmalar yapılmıştır. Ham veri setinde pas akarı, kuş gözü mantarı ve sağlıklı olarak sınıflandırılan örneklerden sırasıyla 890, 950 ve 1460 görüntü bulunmaktadır. Veri setini dengeli bir hale getirmek için en az sayıdaki görüntüden oluşan pas akarı sınıfındaki örnek sayısına diğer sınıfların sayısı eşitlenmiştir.

Şekil 7’de her bir derin öğrenme modeli için eğitim ve kayıp eğrileri verilmiştir. Eğitim sonucunda AlexNet, GoogLeNet, ShuffleNet ve SqueezeNet için kayıp değerleri sırasıyla $3.51e-5$, $9.61e-7$, $1.2e-5$ ve $1.16e-7$ değerlerine ulaşmıştır. Çizelge 2’de ise her bir modelin eğitim ve test süreleri verilmiştir. Burada, SqueezeNet en 115.44dk ile en düşük eğitim süresine sahip iken GoogLeNet 257.85dk ile en yüksek eğitim süresini vermiştir. Ayrıca, AlexNet bir görüntü için 0.00309sn ile en hızlı test performansını sağlamıştır.

Çizelge 2: Derin öğrenme modellerinin eğitim ve test süreleri

Table 3: Training and test times of the deep learning models

Model	Eğitim Süresi (dk)	Test Süresi (sn)
AlexNet	120.61	0.00309
SqueezeNet	115.44	0.00374
ShuffleNet	231.68	0.00524
GoogleNet	257.85	0.00670



Şekil 8: Ham veri setinden elde edilen hata matrisi

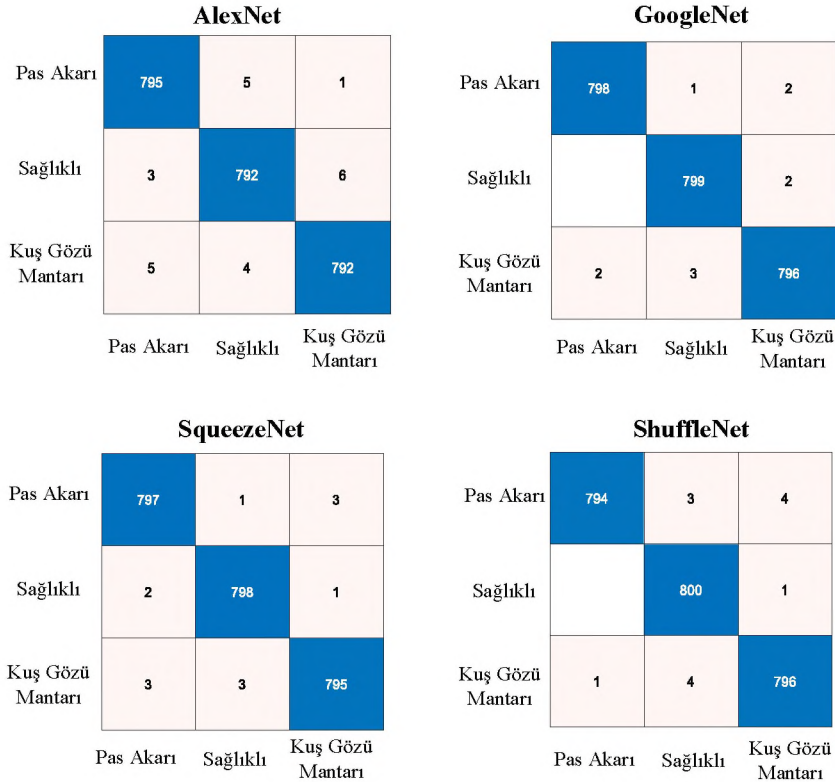
Figure 8: Confusion matrix obtained from raw dataset

DeneySEL çalışmalarından elde edilen hata matrisi her bir model için ayrı ayrı Şekil 8’de sunulmuştur. Ayrıca, performans değerlendirme ölçütlerinin sayısal değerleri Çizelge 3’de verilmiştir. Çizelge 3’den de görüleceği üzere ShuffleNet tüm performans metriklerinde en iyi sonuçları sağlamaktadır. ShuffleNet’ in ortalama doğruluk, duyarlılık, özgüllük, kesinlik ve F1-Skor ölçütlerindeki değerleri sırasıyla %98.51, %98.51, %99.25, %98.52 ve %98.51 olarak hesaplanmıştır. İkinci en iyi sonuçları ise kuş gözü mantarında doğruluk için %99.25, duyarlılık için %99.25, özgüllük için %99.25, kesinlik için %98.51 ve F1-Skor için %98.88 değerlere sahip GoogleNet sağlamıştır. GoogleNet diğer sınıflarda da yine en iyi ikinci performansı göstermiştir. Bu deneysel çalışmada tüm performans değerlendirme ölçütlerinde en düşük sınıflandırma sonuçlarını AlexNet göstermiştir. AlexNet’ in sırasıyla doğruluk, duyarlılık, özgüllük, kesinlik ve F1-Skor ölçütlerindeki ortalama değerleri ise %92.04, %92.04, %96.02, %92.12 ve %92.05’dir.

Çizelge 3: Ham veri setinden elde edilen değerlendirme ölçütlerinin karşılaştırılması

Table 3: Comparison of performance metric results obtained from the raw dataset

Model	Hastalık	Doğruluk	Duyarlılık	Özgüllük	Kesinlik	F1-Skor
AlexNet	Kuş Gözü Mantarı	0.9402	0.9402	0.97014	0.94029	0.94029
	Sağlıklı	0.9253	0.9253	0.94029	0.88571	0.90510
	Pas Akarı	0.8955	0.8955	0.97014	0.93750	0.91603
	Ortalama	0.9204	0.9204	0.9602	0.9212	0.9205
GoogleNet	Kuş Gözü Mantarı	0.9925	0.9925	0.9925	0.9851	0.9888
	Sağlıklı	0.9701	0.9701	0.9962	0.9923	0.9811
	Pas Akarı	0.9776	0.9776	0.9813	0.9632	0.9703
	Ortalama	0.9801	0.9801	0.9900	0.9803	0.9801
ShuffleNet	Kuş Gözü Mantarı	0.9925	0.9925	0.9888	0.9779	0.9851
	Sağlıklı	0.9925	0.9925	0.9925	0.9851	0.9888
	Pas Akarı	0.9701	0.9701	0.9962	0.9923	0.9811
	Ortalama	0.9851	0.9851	0.9925	0.9852	0.9851
SqueezeNet	Kuş Gözü Mantarı	0.9477	0.9477	0.9776	0.9548	0.9513
	Sağlıklı	0.9776	0.9776	0.9776	0.9562	0.9667
	Pas Akarı	0.9552	0.9552	0.9850	0.9696	0.9624
	Ortalama	0.9602	0.9602	0.9801	0.9603	0.9602



Şekil 9: Çoğaltılmış veri setinden elde edilen hata matrisi

Figure 9: Error matrix from the augmented dataset

İkinci aşamada, her bir hastalık türündeki örnekler için veri çoğaltma işlemi gerçekleştirilmiştir. Her hastalıktaki bir görüntüye aynalama/yansıtma, bulanıklaştırma, döndürme, kesme-kaydırma işlemleri uygulanarak örnek sayısı artırılmıştır. Böylece veri setindeki toplam görüntü 19800 olarak elde edilmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen hata matrisi her bir model için Şekil 9'da sunulmuştur.

Çizelge 4: Çoğaltılmış veri setinden elde edilen değerlendirme ölçütlerinin karşılaştırılması

Table 4: Comparison of performance metric results obtained from the augmented dataset

Model	Hastalık	Doğruluk	Duyarlılık	Özgüllük	Kesinlik	F1-Skor
AlexNet	Kuş Gözü Mantarı	0.9925	0.9925	0.9950	0.9900	0.99127
	Sağlıklı	0.9887	0.9887	0.9943	0.9887	0.98876
	Pas Akarı	0.9887	0.9887	0.9956	0.9912	0.99000
	Ortalama	0.9900	0.9900	0.9950	0.9900	0.9900
GoogleNet	Kuş Gözü Mantarı	0.9975	0.9975	0.9988	0.9975	0.9975
	Sağlıklı	0.9988	0.9988	0.9988	0.9975	0.9981
	Pas Akarı	0.9963	0.9963	0.9988	0.9975	0.9969
	Ortalama	0.9975	0.9975	0.9988	0.9975	0.9975
ShuffleNet	Kuş Gözü Mantarı	0.9975	0.9975	0.9988	0.9975	0.9975
	Sağlıklı	0.9963	0.9963	0.9988	0.9975	0.9969
	Pas Akarı	0.9988	0.9988	0.9988	0.9975	0.9981
	Ortalama	0.9975	0.9975	0.9988	0.9975	0.9975
SqueezeNet	Kuş Gözü Mantarı	1	1	0.9993	0.9987	0.9993
	Sağlıklı	0.9962	0.9962	0.9993	0.9987	0.9975
	Pas Akarı	0.9987	0.9987	0.9987	0.9975	0.9981
	Ortalama	0.9983	0.9983	0.9992	0.9983	0.9983

Çizelge 5: Ön eğitimli ağların iyileştirme sonuçları

Table 5: Improvement results of pre-trained networks

Model	Performans Ölçütü	İyileştirme Oranı (%)
AlexNet	Doğruluk	7,56
	Duyarlılık	7,56
	Özgüllük	3,62
	Kesinlik	7,47
	F1-Skor	7,55
GoogleNet	Doğruluk	1,78
	Duyarlılık	1,78
	Özgüllük	0,88
	Kesinlik	1,75
	F1-Skor	1,78
ShuffleNet	Doğruluk	1,26
	Duyarlılık	1,26
	Özgüllük	0,63
	Kesinlik	1,25
	F1-Skor	1,26
SqueezeNet	Doğruluk	3,97
	Duyarlılık	3,97
	Özgüllük	1,95
	Kesinlik	3,96
	F1-Skor	3,97

Veri çoğalta sonucu elde edilen performans değerlendirme ölçütlerinin sayısal değerleri Çizelge 4’de verilmiştir. Çizelge 4’de görüldüğü üzere veri çoğaltma işleminin ardından en iyi performans sonucu SqueezeNet ile elde edilmiştir. SqueezeNet’in ortalama doğruluk, duyarlılık, özgüllük, kesinlik ve F1-Skor ölçütlerindeki değerleri sırasıyla %99.83, %99.83, %99.92, %99.83 ve %99.83 olarak hesaplanmıştır. GoogleNet ve ShuffleNet birbirine oldukça yakın sonuçlar vermiştir. GoogleNet’in pas akarı sınıfındaki doğruluk, duyarlılık, özgüllük, kesinlik ve F1-Skor ölçütlerindeki değerleri sırasıyla %99.63, %99.63, %99.88, %99.75 ve %99.69 iken, ShuffleNet için bu değerler sırasıyla %99.88, %99.88, %99.88, %99.75 ve

%99.81'dir. AlexNet veri çoğaltma işleminden sonra ortalama doğruluk, duyarlılık, özgüllük, kesinlik ve F1-Skor değerleri sırasıyla %99.00, %99.00, %99.50, %99.00, %99.00 olarak elde edilmiştir.

Yapılan veri artırma işleminden sonra derin öğrenme modelleri daha fazla görüntü ile eğitilmiştir. Bunun sonucunda, her bir model yönteminin performans metrik ölçütlerindeki sayısal değerlerde iyileşme olduğu görülmüştür. Bu iyileştirme sonuçları Çizelge 5'de detaylıca sunulmuştur. Çizelge 5'e göre veri artırma işlemi ile AlexNet'in değerlendirme ölçütlerinde doğruluk için %7.56, duyarlılık için %7.56, özgüllük için %3.62, kesinlik %7.47 ve F1-Skor için %7.55'lik bir artışın olduğu görülmektedir. Bu değerler GoogleNet için sırasıyla %1.78, %1.78, %0.88, %1.75 ve %1.78 olarak elde edilmiştir. ShuffleNet ve SqueezeNet için ise doğrulukta %1.26-%3.97, duyarlılıkta %1.26-%3.97, özgüllükte %0.63-%1.95, kesinlikte %1.25-%3.96 ve F1-Skorda %1.26-%3.97 olarak iyileştirme yüzdeleri hesaplanmıştır

SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada, zeytin yaprağındaki hastalıkların teşhisi ve sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. Veri setinde bulunan her hastalık sınıfındaki örnekler veri çoğaltma yöntemi ile artırılmıştır. Böylece daha fazla sayıda örnekten oluşan bir veri seti hazırlanarak derin öğrenme modellerinin başarımlarının artırılması amaçlanmıştır. Veri seti dengelenerek oluşturulan eğitim örnekleri en çok kullanılan AlexNet, GoogleNet, ShuffleNet ve SqueezeNet gibi ön eğitilmiş modellere uygulanmıştır. Çalışmada kullanılan her bir derin öğrenme modeli için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar değerlendirme ölçütlerine göre analiz edilmiştir. Zeytin yaprağındaki hastalıkların teşhisi için ham veri setinde en iyi sonuçları doğruluk için %98.51, duyarlılık için %98.51, özgüllük için %99.25, kesinlik için %98.52 ve F1-Skor için %98.51 değerleri ile ShuffleNet sağlamıştır. Artırılmış veri setinde ise en iyi sonuçları SqueezeNet göstermiştir. Ayrıca, artırılmış veri seti sayesinde ham veri setindeki sonuçlar AlexNet için %3.62 ile %7.56, GoogleNet için %0.88 ile %1.78, ShuffleNet için %0.63 ile %1.26 ve SqueezeNet için %1.95 ile %3.97 arasında iyileştirilmiştir.

İleriki çalışmalarda ise farklı ESA yapıları geliştirilip özellik seçim ve çıkarım işlemleri ile kombine edilerek daha doğru ve güvenilir sınıflandırma sonuçlarının elde edilebileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Albawi S., Mohammed T. A., Al-Zawi S., 2017, "Understanding of a convolutional neural network", *International Conference on Engineering and Technology (ICET)*, ss. 1-6.
- Bloice M. D., Christof S., Andreas H., 2017, "Augmentor: an image augmentation library for machine learning", çevrimiçi, <https://arxiv.org/abs/1708.04680>.
- Buda M., Maki A., Mazurowski M. A., 2018, "A systematic study of the class imbalance problem in convolutional neural networks", *Neural Networks*, Cilt 106, ss. 249-259.
- Darwish A., Ezzat D., Hassanien A. E., 2020, "An optimized model based on convolutional neural networks and orthogonal learning particle swarm optimization algorithm for plant diseases diagnosis", *Swarm and evolutionary computation*, Cilt 52, Sayı 100616, ss. 1-12.
- Deepak S., Ameer, P. M., 2019, "Brain tumor classification using deep CNN features via transfer learning", *Computers in biology and medicine*, Cilt 111, ss. Sayı 103345, ss. 1-7.
- Deng J., Dong W., Socher R., Li L. J., Li K., Fei-Fei L., 2009, "ImageNet: A large-scale hierarchical image database", *2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, ss. 248-255.
- Erilmez S., Erkan S., 2014, "The identification of virus diseases in olive trees in Aydin, Balıkesir and İzmir provinces and the determination of their present status" *Plant Protection Bulletin*, Cilt 54, Sayı 1, ss. 45-67.
- Floridi L., 2020, "AI and Its New Winter: from Myths to Realities", *Philosophy & Technology*, Cilt 33, ss. 1-3.
- GeethaRamani R., ArunPandian J., 2019, "Identification of plant leaf diseases using a nine-layer deep convolutional neural network", *Comput. Electr. Eng.*, Cilt 76, ss. 323-338.

- Iandola F. N., Han S., Moskewicz M. W., Ashraf K., Dally W. J., Keutzer K., 2016, "SqueezeNet: AlexNet-level accuracy with 50x fewer parameters and <0.5MB model size", International Conference on Learning Representations (ICLR), çevrimiçi, <https://arxiv.org/abs/1602.07360>, ss. 1-13.
- Jadhav S. B., Udipi V. R., Patil S. B., 2021, " Identification of plant diseases using convolutional neural networks", *Int. j. inf. tecnol*, Cilt 13, ss. 2461–2470.
- Korkut U. B., Göktürk Ö. B., Yıldız O., 2018, "Detection of plant diseases by machine learning" *26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, ss. 1-4.
- Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton, G. E., 2012, "Imagenet classification with deep convolutional neural networks" *Advances in neural information processing systems*, Cilt 25, ss. 1-9.
- Liu B., Zhang Y., He D., Li Y., 2018, "Identification of Apple Leaf Diseases Based on Deep Convolutional Neural Networks" *Symmetry*, Cilt 10, Sayı 11, ss. 1-16.
- Mohanty P. S., Hughes P. D., Salathé M., 2016, "Using deep learning for image-based plant disease detection", *Frontiers in Plant Science*, Cilt 7, Sayı 1419, ss. 1-10.
- O'Shea K., Nash R., 2015, "An introduction to convolutional neural networks", çevrimiçi, <https://arxiv.org/abs/1511.08458>, ss. 1-11.
- Pawar P., Turkar V., Patil P., 2016, "Cucumber disease detection using artificial neural network", *International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)*, Cilt 3, ss. 1-5.
- Shorten C., Khoshgoftaar T. M., 2019, "Shorten, Connor, and Taghi M. Khoshgoftaar. "A survey on image data augmentation for deep learning", *Journal of big data*, Cilt 6, Sayı 1, ss. 1-48.
- Szegedy C., Liu W., Jia Y., Sermanet P., Reed S., Anguelov D., Erhan D., Vanhoucke V., Rabinovich A., 2015, "Going Deeper With Convolutions", *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, ss. 1-9.
- Türkoğlu M., Hanbay K., Saraç Sivrikaya I., Hanbay D., 2020, "Derin Evrişimsel Sinir Ağı Kullanılarak Kayısı Hastalıklarının Sınıflandırılması", *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Cilt 9, Sayı 1, ss. 334-345.
- Uğuz S., *CNN_olive_Dataset*, https://github.com/sinanuguz/CNN_olive_dataset, ziyaret tarihi: 23.02.2022.
- Uğuz S., Uysal N., 2021, "Classification of olive leaf diseases using deep convolutional neural networks", *Neural Comput & Applic*, Cilt 33 Sayı 9, ss. 4133–4149.
- Upadhyay S. K., Kumar A., 2021, "Early-stage brown spot disease recognition in paddy using image processing and deep learning techniques", *International Information and Engineering Technology Association*, Cilt 38, Sayı 6, ss. 1755-1766.
- Uysal N., 2020 *Zeytin yaprağındaki hastalıkların derin öğrenme teknikleri kullanılarak sınıflandırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Isparta.
- Zhang X., Zhou X., Lin M. Sun J., 2018, "ShuffleNet: an extremely efficient convolutional neural network for mobile devices" *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, ss. 6848-6856.



NUMERICAL EXAMINATION OF A SOLAR CHIMNEY POWER PLANT DESIGNED FOR THE ISKENDERUN REGION

¹Mustafa ÖNAL , ²Ali KOÇ , ³Özkan KÖSE , ⁴Yıldız KOÇ , ⁵Hüseyin YAĞLI 

^{1, 2, 3, 4} Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, İskenderun Technical University, İskenderun, Hatay, TURKIYE

⁵ Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Gaziantep University, Gaziantep, TURKIYE

¹mustafa.onal@iste.edu.tr, ²ali.koc@iste.edu.tr, ³ozkan.kose@iste.edu.tr, ⁴yildiz.koc@iste.edu.tr, ⁵yagli@gantep.edu.tr

Geliş/Received: 21.04.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 14.06.2022

ABSTRACT: Today, energy is accepted as the most indicator of economic development. However, the use of fossil fuels as energy sources is caused the depletion of the ozone layer, global warming and climate change. Therefore, using renewable energy systems called sustainable energy is a remarkable step in terms of both minimizing fossil fuel consumption and the effects of the environment on human health. In this study, solar chimneys, one of the solar-assisted electricity generation systems among renewable energy sources, are analyzed. A solar chimney power plant (SCPP) has been designed by considering the environmental conditions of the İskenderun region in Hatay province. The facility consists of collector, chimney, turbine and generator. Sun rays entering the solar chimney from the transparent collector heat the air. The heated air leaves the solar chimney with the effect of the pressure difference. The turbine is placed in the chimney section where the air velocity is high. The mechanical power obtained from the turbine is converted into electrical energy through the generator. The energy source of the system is the sun, and the working fluid of the system is air. In the calculations, the average irradiance value of the İskenderun region was used and optimization of the designed SCPP was made using these values. The optimization of the SCPP designed for the İskenderun region is performed using numerical analysis programs.

Keywords: Solar chimney, Renewable energy, Solar energy, CFD

İskenderun Bölgesi İçin Tasarlanan Güneş Baca Santrali Sayısal İncelemesi

ÖZ: Günümüzde enerji, ekonomik gelişmişliğin en önemli göstergesi olarak kabul edilmektedir. Ancak fosil yakıtların enerji kaynağı olarak kullanılması ozon tabakasının incelmeye, küresel ısınma ve iklim değişikliğine neden olmaktadır. Bu nedenle sürdürülebilir enerji olarak adlandırılan yenilenebilir enerji sistemlerinin kullanılması hem fosil yakıt tüketimini en aza indirmek hem de çevrenin insan sağlığına etkileri açısından dikkate değer bir adımdır. Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisi destekli elektrik üretim sistemlerinden biri olan güneş bacaları incelenmiştir. Hatay ili İskenderun bölgesinin çevre koşulları dikkate alınarak güneş bacalı elektrik santrali (SCPP) projelendirilmiştir. Tesis kollektör, baca, türbin ve jeneratörden oluşmaktadır. Şeffaf kollektörden güneş bacasına giren güneş ışınları havayı ısıtmaktadır. Isınan hava, basınç farkının etkisiyle güneş bacasını terk etmektedir. Türbin, hava hızının yüksek olduğu baca bölümüne yerleştirilmektedir. Türbinden elde edilen mekanik güç, jeneratör vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Sistemin enerji kaynağı güneş, sistemin çalışma akışkanı ise havadır. Hesaplamalarda İskenderun bölgesinin ortalama ışınım değeri kullanılmış

ve bu değerler kullanılarak tasarlanan SCPP'nin optimizasyonu yapılmıştır. İskenderun bölgesi için tasarlanan SCPP'nin optimizasyonu sayısal analiz programları kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Güneş bacası, Yenilenebilir enerji, Güneş enerjisi, HAD

1. INTRODUCTION

Considering today's climatic conditions and the fluctuating epidemic process, energy constitutes the lifeblood of economies for developed or developing countries. In addition, the closure of countries and the disruption of supply processes, the increasing population density cause an increase in the burden on e-commerce, and therefore, the dependence on technology is constantly increasing. As a result of this, problems in energy supply and the inability to meet the demand are seriously on the agenda. Also, a bigger problem is the depletion of fossil fuels and the inability to fully improve energy sources that can replace them (Mert et al., 2020). For this reason, serious studies are being carried out on the variety of new systems suitable for non-traditional renewable energy sources such as solar, wind, hydroelectric and biomass (Karami et al., 2021; Tan et al., 2022; Nassar et al., 2021; Roy and Samanta, 2021; Koç et al., 2020). However, the most remarkable sustainable energy source among these energy sources is solar energy. Many serious studies continue on solar energy such as solar towers, parabolic trough systems, photovoltaic systems and combined systems. In this study, the solar chimney, which is one of the solar-assisted electricity generation systems, is discussed. SCPP is enabled carbon-free electricity generation leading to sustainable growth and development towards a green economy and a safer environment. It is also used for other applications such as air conditioning, desalination, electrical power generation and agri-food processing (Das and Chandramohan, 2020). SCPP has three basic components. These are the absorbing ground layer, the solar collector and the solar chimney. In addition, a turbine connected to the generator is required to convert the kinetic energy of the air into electrical energy (Das and Chandramohan, 2020). The theoretical concept of the solar chimney plant was first developed by Hanns Gunther at the beginning of the 19th century and the first plant was built in Manzanares, Spain under the supervision of J. Schlaich, and the theoretical description of the solar chimney was provided by Haaf et al. (Haaf et al., 1983). Later, Schlaich et al. investigated the commercial and economic viability of a large-scale plant (up to 200 MW). Apart from these, there are many studies on solar chimneys. Sing et al. performed the CFD analysis of the hybrid PV and solar chimney, taking into account the solar radiation of 850 W/m^2 , assuming zero inlet and outlet pressures. They used a solar chimney height of 3 meters and a collector radius of 1.5 meters. They made 4 different mesh improvements and reached the maximum number of 225820. Ultimately, the solar chimney power output of 2.258 W was obtained as the best result (Singh et al., 2020). Nasraoui et al. designed a conventional, parallel and counter-flow solar collector to increase the efficiency of the solar chimney. During the CFD analysis, a maximum of 300746 mesh was used and the solar chimney inlet and outlet pressures were accepted as zero. They also accepted the solar radiation as 880 W/m^2 . As a result of their studies, they claimed that they increased the system efficiency up to 28% (Nasraoui et al., 2020). Kebabsa et al. investigated the solar chimney in two dimensions. A power of 0.34 W was obtained from the solar chimney with a height of 12.3 meters and a radius of 12.5 meters, and they claimed that the optimum collector inlet angle was 9.1 degrees (Kebabsa et al., 2020).

Considering all these studies, there is almost no study that used the working fluid that is accepted as compressible fluid. Besides, in most of the studies, the sun was not defined as well as the pressure difference that would occur due to the height difference between the chimney inlet and outlet was not defined. In this study, the working fluid was accepted as an ideal gas. The location of the Iskenderun region, the date and time were selected and the sun was defined, the solar chimney outlet pressure was identified to the system by calculating the pressure drop depending on the height of the chimney.

2. SYSTEM DESCRIPTION

When designing SCPPs, the design should be made by considering many variables. Within the scope of this study, the parameters in Table 1 were accepted as constant.

Table 1. Beginning parameters for solar chimney

h (m)	R (m)	α (°)	β (°)	r (m)	a(m)	I (W/m²)
0.6	20	5	2	2.75	2	700

The main variables in the geometric design of the SCPP are; collector inlet height (h), collector radius (R), collector angle (α), divergent angle (β), chimney radius (r), radius of the curve between collector and chimney connection (a), solar radiation (I) and chimney height (H). The parameters in Table 1 were considered constant and optimization were performed for different chimney heights. The schematic outlook of the SCPP is shown in the Figure 1.

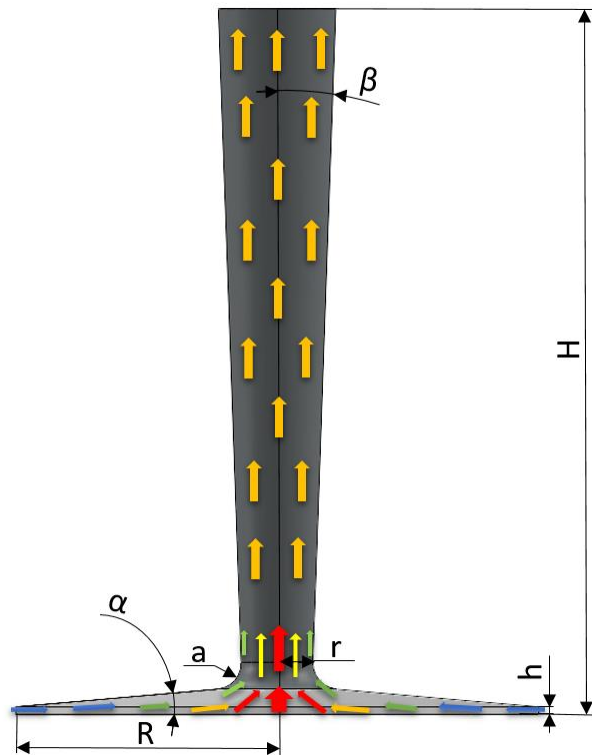


Figure 1. The schematic outlook of the SCPP

After the design parameters of the SCPP are identified in the numerical analysis program, it needs to be divided into many small parts. These parts are called meshes. As the number of mesh elements increases, the system is divided into smaller parts and more accurate results are obtained in the numerical analysis. The mesh structure of the solar chimney is shown in Figure 2.

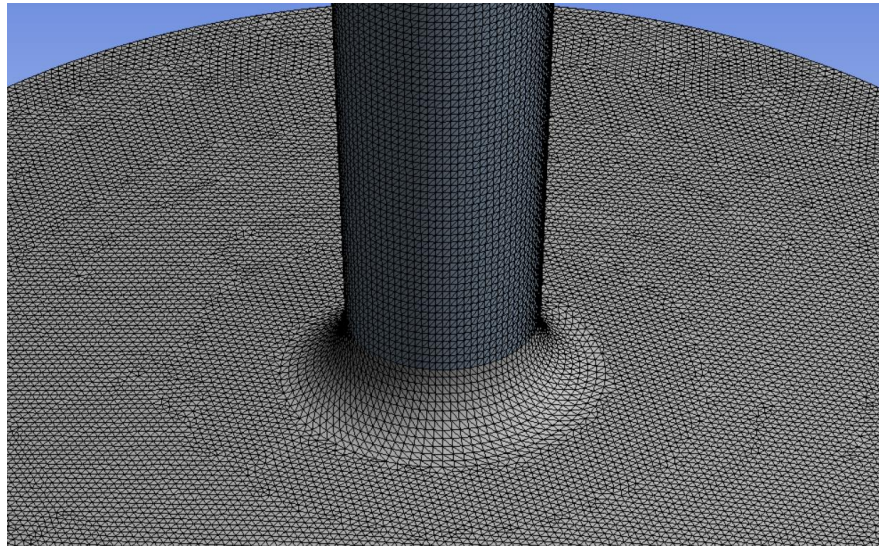


Figure 2. The mesh structure of the solar chimney

On the other hand, it is as important as the number of mesh elements in which regions the mesh is more frequent. The parameters such as velocity or temperature are shown rapidly changes in the regions near the surface. Therefore, the mesh should be tightened in the regions near the surface. In Figure 3, it is seen that the mesh applied on the SCPP becomes denser in a way that it consists of 3 layers in the regions near the chimney surface.

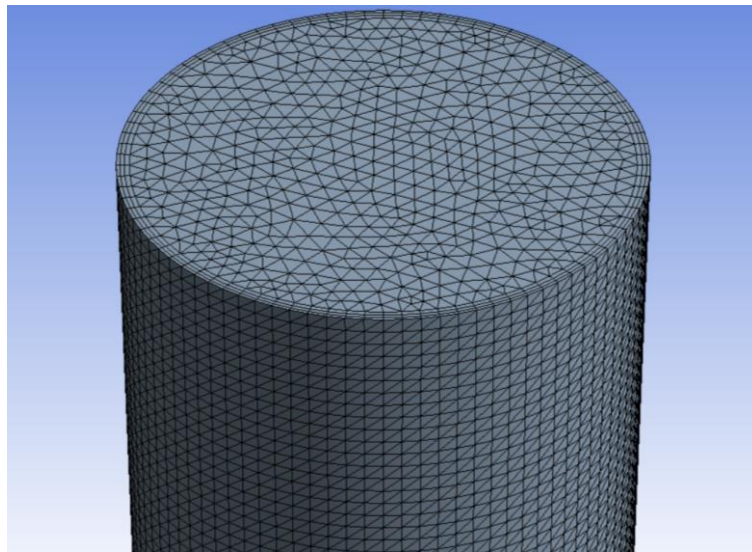


Figure 3. Mesh structure on the chimney outlet surface

This dense mesh structure consisting of 3 layers on the chimney surface continues throughout the collector. On the ground, the number of these dense layers has been increased to 4. The reason for this is that high temperature differences will occur at unit distances perpendicular to the ground, unlike the adiabatic chimney surface. The mesh structure in the air inlet area is given in the Figure 4.

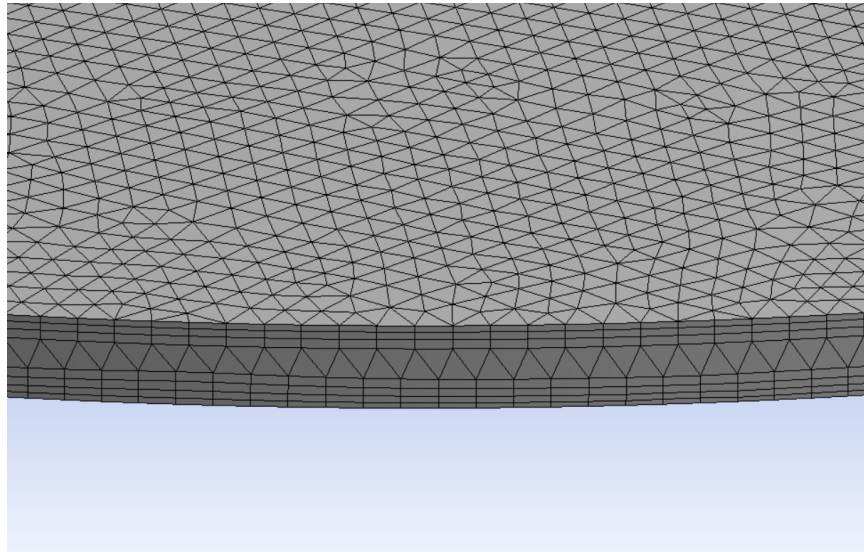


Figure 4. Mesh structure in the air inlet area

Considering the mesh properties above, for an SCPP with a chimney height of 50 m, the number of mesh elements and the number of nodes applied on the SCPP were carried out as 1384905 and 400394, respectively.

After the mesh structure was completed, the problem was defined in the numerical analysis program. While making these definitions, several different methods from the literature were used. The first of these differences is fluid selection. In many publications, the fluid has been chosen as an incompressible fluid, but in this study, the fluid has been accepted as an ideal gas. The second difference is that in many publications, the heat source was applied from the ground by determining an average heat flux or a constant temperature was determined for the ground. Another difference is related to the boundary conditions, the pressure of the air in the inlet and outlet regions of the system is defined as 101325 Pa in many publications. Table 2 shows the boundary conditions of the system.

Table 2. Boundary Conditions

Boundary Conditions	Model features
SCPP Inlet Pressure	$P_{in} = 101325 \text{ Pa}$
Ambient Temperature	$T_0 = 300 \text{ K}$
SCPP Output Pressure	$P_{out} = P_{in} - \rho \cdot g \cdot H$
Ground	Opaque
Collector	Transparent
Chimney	Opaque and insulated

3. MATHEMATICAL MODEL

The energy equations should be chosen considering the boundary conditions. In this study, Navier-Stokes and continuity equations are used to explain the flow in the x, y and z directions. The y-direction is opposite to the direction of the gravitational force (Cable, 2009).

The momentum in the x-direction;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uu) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vu) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho wu) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

The momentum in the y-direction;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vv) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho wv) = -\frac{\partial P}{\partial y} + (v + v_t) \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

The momentum in the z-direction;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uw) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vw) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho ww) = -\frac{\partial P}{\partial z} + (v + v_t) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

Continuous flow equation;

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (4)$$

Shih's Realizable model is lately the most remarkable model among the three k- ϵ variations for the SSCP. This model has two important differences from the standard k- ϵ model. It is used novel equality for turbulent viscosity, and the dissipation rate equation is obtained from the equality for transporting the mean square eddy fluctuation. The form of the eddy viscosity equations is dependent on feasibility constraints and the positivity of normal Reynolds stresses as well as the Schwarz inequality for turbulent shear stresses. The realizable k- ϵ model is more suitable and accurate than standard or RNG k- ϵ models in predicting flows like discrete flows and flows that have complex secondary flow characteristics (Shih et al., 1995). In this study, the realizable k- ϵ turbulence model was applied as a turbulence model. Transport equations for realizable k- ϵ turbulence model;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_m \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k \epsilon_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{v \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b \quad (6)$$

While G_k represents the generation of turbulent kinetic energy due to mean velocity gradients, G_b is the generation of turbulent kinetic energy because of buoyancy. Also, Y_m refers to the fluctuating dilation incompressible turbulence that contributes to the overall dissipation rate. In addition, S_ϵ and S_k are parameters defined by depending on the study performed. Moreover α_k and α_ϵ are indicated the turbulent Prandtl numbers for the turbulent kinetic energy and its dissipation. The eddy viscosity μ_t is calculated from equation 7 (Shih et al., 1995);

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (7)$$

The value of C_μ is calculated from equation 8 (Shih et al., 1995);

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_S \frac{k U^*}{\epsilon}} \quad (8)$$

$$U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}} \quad (9)$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk}\omega_k - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k \quad (10)$$

In the above equation, $\bar{\Omega}_{ij}$ is the average rate of rotation tensor which is observed in a rotating reference frame that has an angular velocity ω_k . The constants A_0 and A_s are as follows (Shih et al., 1995);

$$A_0 = 4.04, \quad A_s = \sqrt{6} \cos \varphi \quad (11)$$

$$\varphi = \frac{1}{3} \cos^{-1} \left(\sqrt{6} \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\bar{S}^3} \right), \quad \tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (12)$$

It is seen that the C_μ value is a function which is depended on the angular velocity, the rotational rates and the mean strain, its dissipation rate and the turbulent kinetic energy when considered the rotating system. The standard value of $C_\mu = 0.09$ is obtained from the solution of equation 8 for an inertial sublayer in the equilibrium boundary layer (Shih et al., 1995):

$$C_1 = \max \left(\frac{\psi}{5+\psi}, (0.43) \right) \quad (13)$$

$$\psi = S \left(\frac{k}{\varepsilon} \right) \quad (14)$$

$$C_{1\varepsilon} = 1.44 \quad C_2 = 1.9 \quad \sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\varepsilon = 1.2$$

G_b value for ideal gases;

$$G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho Pr_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_j} \quad (15)$$

$$C_{3\varepsilon} = \tanh \left| \frac{v}{u} \right| \quad (16)$$

k and ε are turbulent kinetic energy and dissipation rate, respectively.

$$\rho = \rho_0 (1 - \beta(T - T_0)) \quad (17)$$

ρ_0 and β are reference density and coefficient of thermal expansion, respectively.

The discrete coordinate model (DO) is chosen to calculate the solar radiation coming into the system. The following equations are used in this model;

$$\nabla \cdot (I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (\alpha_\lambda, \sigma_s) I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) = \alpha_\lambda n^2 I_{b\lambda} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{r}, \vec{s}') d\Omega' \quad (18)$$

α_λ , σ_s , n and λ are absorption coefficient, reflection coefficient, refractive index and wavelength, respectively. The total luminous intensity in the \vec{s} direction is equal to the amount of spectral luminous intensity over the wavelength bands and is written as;

$$I(\vec{r}, \vec{s}) = \sum_k I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) \Delta\lambda_k \quad (19)$$

In the SCPP, the Grashof number is expressed as;

$$Gr = \frac{g\beta}{\vartheta^2} \Delta TH^3 \quad (20)$$

$$\Delta T = T_{out} - T_{in} \quad (21)$$

ϑ and g represent kinematic viscosity and gravitational acceleration, respectively. The Richardson number is the ratio of the Grashof number to the square of the Reynolds number. If the Richardson number is over 10, forced convection; If it is below 0.1, natural convection can be neglected. Between 0.1 and 10, it represents a mixed convection flow in which both types of convection cannot be neglected (Shih et al., 1995).

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} \quad (22)$$

$$P = \frac{1}{2} B \dot{m} v^2 \quad (23)$$

$$\dot{m} = \rho A v \quad (24)$$

\dot{m} , ρ and A values are mass flow rate, density and cross-sectional area, respectively. P refers to the power obtained from the turbine. According to Betz's law, not all of the air coming into a turbine can be converted into kinetic energy. Up to 59.25% of the air coming into the turbine can be converted into kinetic energy. This value is called the Betz constant and is referred to B (Setia et al., 2021).

$$A = \pi R^2 \quad (25)$$

$$\eta = \frac{P}{IA} \quad (26)$$

A and η represent the surface area of the floor of the SCPP and the efficiency, respectively.

$$\eta_{col} = \frac{\dot{m} c_p \Delta T}{IA} \quad (27)$$

The commonly used expression of collector efficiency is expressed as η_{col} :

$$\eta_{chim} = \frac{gH}{c_p T_{out}} \quad (28)$$

For the efficiency of the chimney, the expression η_{chim} is used.

$$\eta_{SCPP} = \eta_{col} \eta_{chim} \quad (29)$$

$$\eta_{SCPP} = \frac{\dot{m} g H \Delta T}{IA T_{out}} \quad (30)$$

The expression η_{SCPP} is used for the efficiency of the SCPP.

4. RESULTS And DISCUSSIONS

Numerical analyzes were made for the SCPP with 4 different chimney heights. As a result of the analyzes made, the velocity gradients formed in the SCPP with a chimney height of 50 meters are seen in the Figure 5.

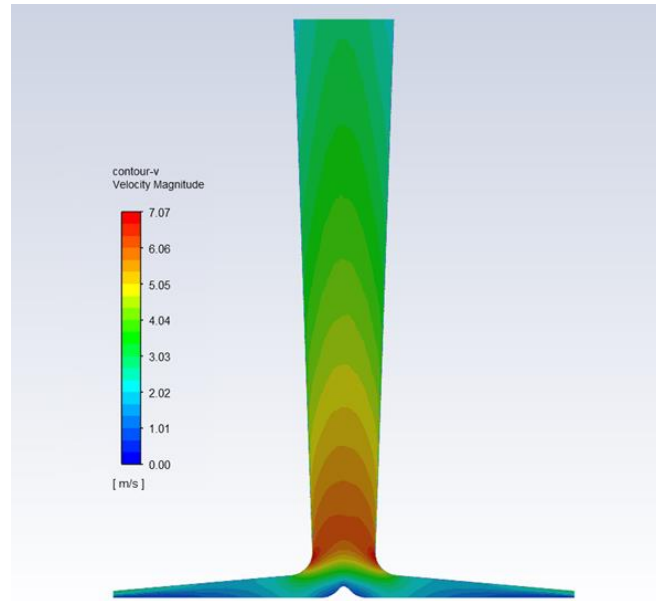


Figure 5. Velocity gradient

As seen in Figure 5, the velocity reaches its highest level in the narrow section of the chimney. Again, the pressure gradients formed in the SCPP with a chimney height of 50 meters are seen in the Figure 6.

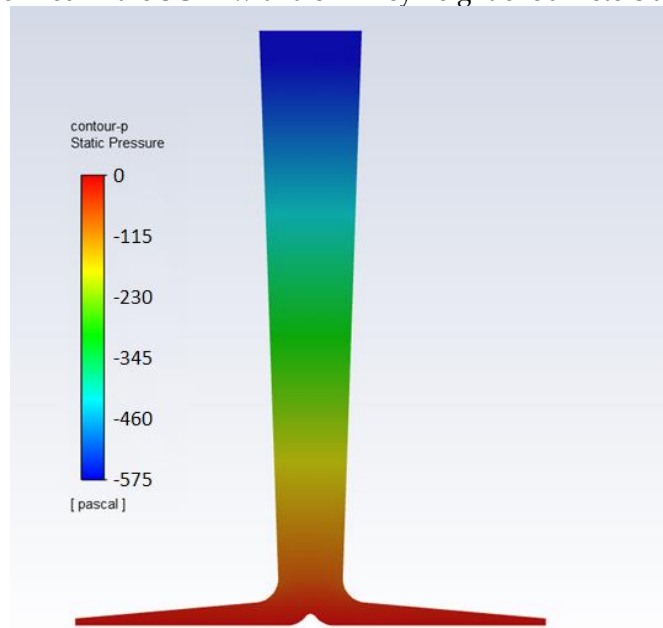


Figure 6. Pressure gradient

In many studies, since the inlet and outlet pressures are the same, pressure gradients are measured as atmosphere pressure on the ground and at the chimney outlet, and some negative pressure occurs in the narrow section of the chimney (Nasraoui et al., 2020). In this study, a pressure difference of 575 Pa occurs between the inlet and outlet points of the air. In Figure 6, it is seen that the pressure decreases regularly from the floor toward the chimney outlet. These pressure values read in Figure 6 are relative pressure values. The velocity vectors formed in the SCPP with a chimney height of 50 meters and in the narrow section of the chimney are comprehensively shown in the Figure 7.

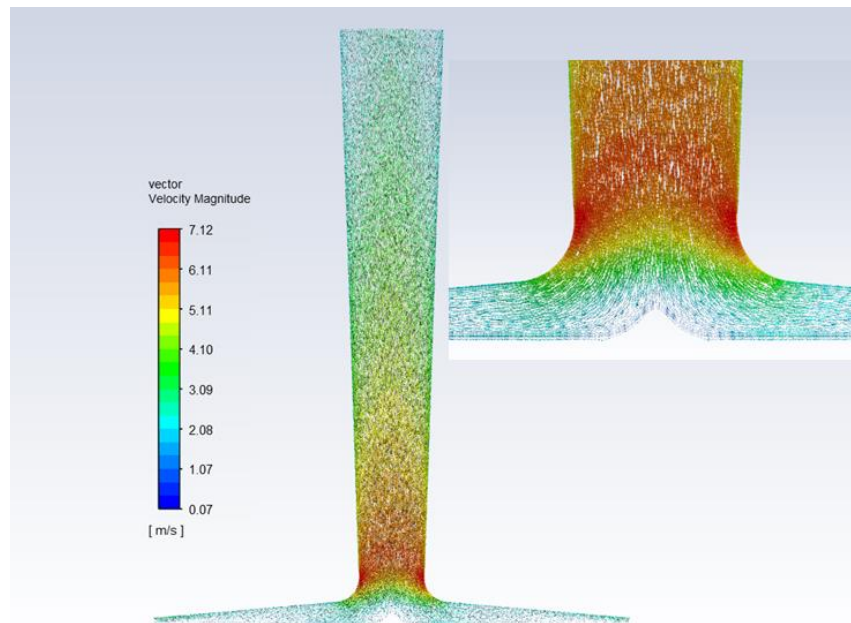


Figure 7. Velocity vectors

As the air enters the system at very low speeds at the collector inlet, its velocity increases rapidly as it moves towards the collector center. As the air enters the narrow section of the chimney, it changes direction and moves upwards. Since the air cannot change its direction suddenly at the junction of the collector and the chimney where this direction change is experienced, the vortex is occurred and energy losses are observed. In order to prevent these energy losses while designing, a curve with a radius of 2 m was formed on the chimney and collector connection area. In this way, all velocity vectors are aligned upwards in the narrow section of the chimney. Since the SCPP is expanded an angle of 2 degrees towards the chimney outlet, the air velocity decreases as one moves towards the solar chimney outlet. The temperature distribution formed in the cross-section of the SCPP which has a chimney height of 50 meters is shown in the Figure 8.

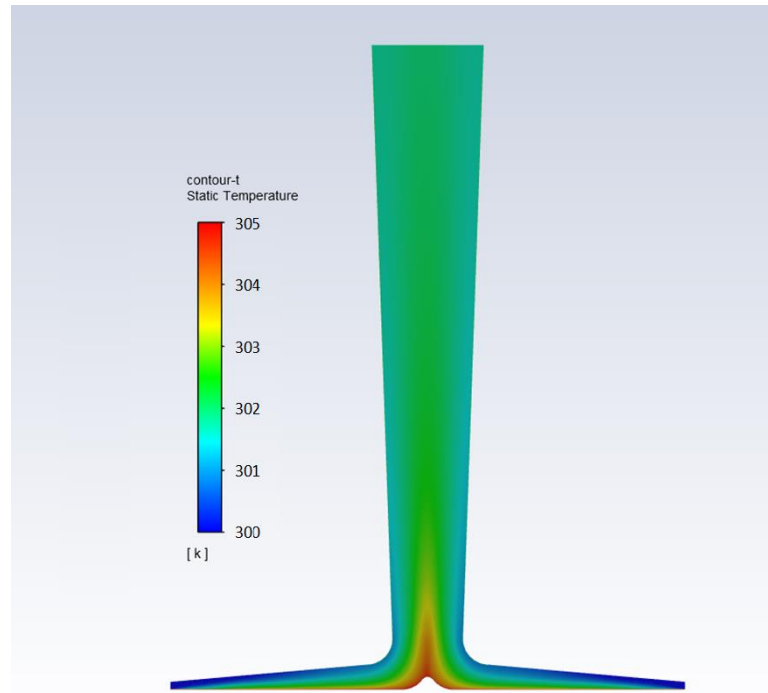


Figure 8. Temperature gradient

As solar radiation is absorbed by the ground, an increase in temperature is observed on the ground. Due to the increase in the temperature difference between the air and the ground, the heat transfer rate is increased and the air temperature is started to increase in the regions near the ground.

As the air is transmitted into the center of the collector, its temperature continues to increase until it reaches the chimney inlet. In the region below the chimney inlet, this temperature reaches the highest value. Then, as the air rises from the chimney, the temperature is distributed homogeneously and the average temperature remains constant throughout the adiabatic chimney. The numerical analyzes are performed for 4 different SCPPs which have 50, 100, 150 and 200 meters height. As a result of the analyzes made, the velocity, mass flow rate and chimney outlet temperature values formed in the narrow section of the chimney are shown in the Figure 9.

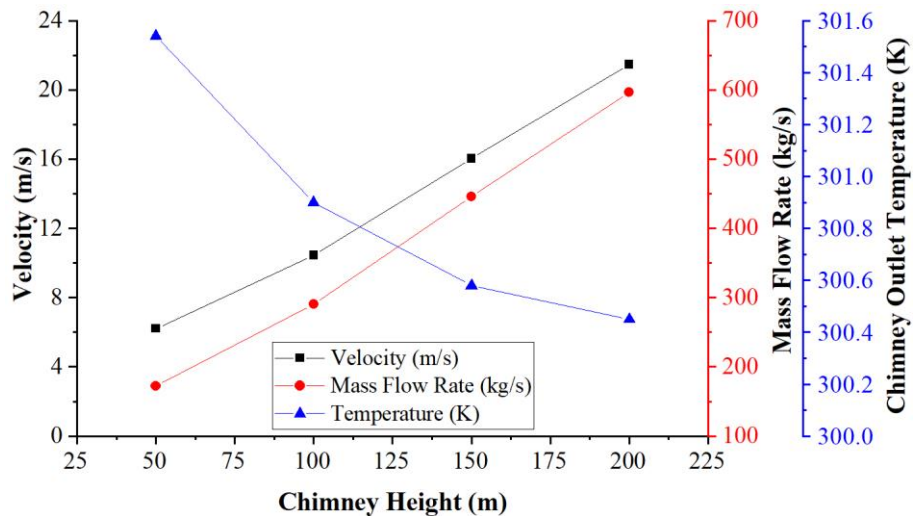


Figure 9. The velocity, mass flow rate and chimney outlet temperature values formed in the narrow section of the chimney

The narrow section of the chimney is where the speed is highest throughout the entire system and therefore the turbine is placed in this region. Basically, there are two main parameters that increase the speed value. While the first of these is the collector diameter, the second is the height of the chimney. Firstly, as the collector diameter increases, the total amount of radiation entering the system also increases. Also, the high amount of radiation is increased the floor temperature and therefore the heat transfer rate is heightened. In this way, after the air temperature increases, the heated air is swiftly raised. In addition, the density of the heated air on the ground decreases and it is subjected to a force along the chimney due to the density difference. Secondly, as the height of the chimney increases, it is observed that it is more exposed to this force and the velocity of the working fluid increases. The lowest and highest velocity values in the narrow section of the chimney were calculated as 6.22 m/s and 21.46 m/s for 50 and 200 m chimney heights, respectively.

As soon as the air enters the system, the velocity of the working fluid is varied depending on the cross-sectional area, but the mass flow rate is constant. The measured mass flow rate values at the collector inlet, chimney outlet and narrow section of the chimney are the same. As the height of the chimney increases, negligible changes are observed in the density value, on the other hand, although the cross-sectional area is not changed, and the velocity value changes dramatically. Therefore, considering equation 24, it is seen that the mass flow rate and velocity value are increased in direct proportion to each other. In Figure 9, it is seen that the mass flow rate values formed in the narrow section of the chimney are directly proportional to the height of the chimney. When evaluated the mass flow rate results in the graph, while the lowest mass flow rate in the narrow section of the chimney was calculated as 172.45 kg/s at the 50 m chimney height, the highest mass flow rate is found as 596.22 kg/s at 200 m at chimney height.

As the height of the chimney increases, it is clearly seen that the speed and flow values are increased with the effect of the pressure difference, but the temperature values decrease. The reason for this is that the amount of air in contact with the ground increases thanks to the rising air velocity, and more air mass shares the heat transferred from the ground. For this reason, the amount of increase in the temperature of the air decreases as the height of the chimney increases. The lowest and highest temperature values at the chimney outlet are calculated as 300.45-301.54 K for 200 and 50 m chimney heights, respectively. The power and efficiency values calculated depending on the changing chimney heights are shown in the Figure 10.

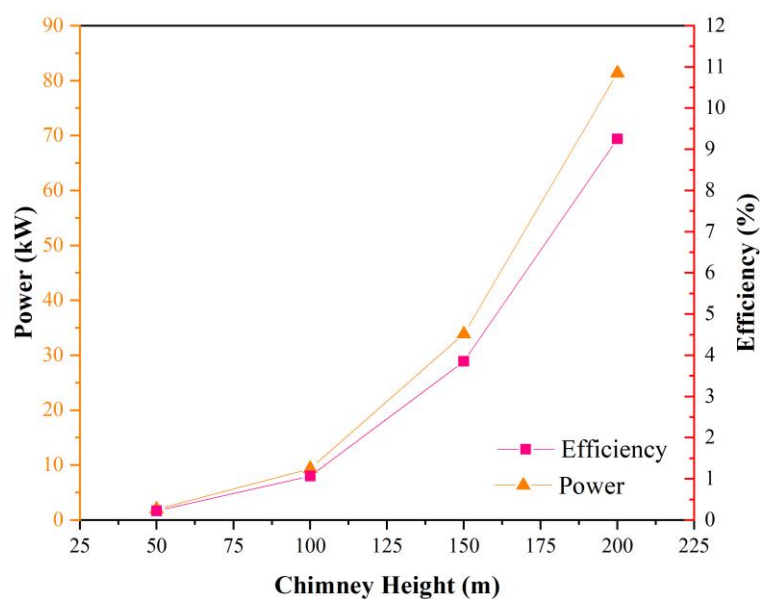


Figure 10. Power and efficiency values

While calculating power and efficiency values of the SCPP, equation 23 and equation 26 are used, respectively. Starting from equation 23, it can be said that power is proportional to the cube of the velocity when the changes in density are ignored. As the height of the chimney increases, the velocity value is increased and therefore the power value of the SCPP obtained is also increased in direct proportion to the cube of the velocity. The efficiency value of the SCPP is the ratio of the obtained power to the total solar radiation entering the system. Since the total solar radiation is not changed as the height of the chimney increases, the efficiency value of the SCPP is changed directly proportional to the power. For this reason, the efficiency value of the SCPP is increased in direct proportion to the cube of the speed as the height of the chimney increases, just like the power value. Among the designs, the lowest and highest power and efficiency values were calculated as 1.97 kW, 81.38 kW and 0.22%, 9.25% for 50 and 200 m chimney heights, respectively. In the Table 3, some efficiency values obtained in this study are compared with the efficiency values obtained from other studies in the literature.

Table 3. Efficiency values

Study	H (m)	η (%)	η_{col} (%)	η_{chim} (%)	η_{SCPP} (%)
This study	50	0.22	30.3	0.16	0.049
	100	1.07	29.9	0.32	0.097
	150	3.85	29.5	0.49	0.144
	200	9.25	30.8	0.65	0.200
Sivaram et al., 2020	0.45	-	26.4	0.45	0.0012
Das and Chandramohan, 2019	6	-	60.5	0.025	0.0018
Al-Kayiem et al., 2019	6.65	-	64.0	-	-
Xu and Zhou, 2018	194.6	-	29.4	-	-
Zuo et al., 2020	194.6	-	13.5	-	-

In the Table 3, it is seen that when a few studies focusing on the SCPP is evaluated, the efficiency values of the SCPP are calculated by using different equations. In some studies, giving the collector efficiency is sufficient, while in others, this value is multiplied by the chimney efficiency to obtain the solar chimney efficiency. When the obtained values are compared to each other, it has been determined that the collector efficiency is an independent value from the chimney height, but the chimney efficiency is directly proportional to the chimney height. For this reason, as the height of the chimney is increased, although the collector efficiency remained constant, the efficiency of the chimney and solar chimney increased.

5. CONCLUSION

The SCPP generates power thanks to the rays of the sun, which is one of the renewable energy sources. The amount of the generated power and efficiency of the SCPP is directly related to the geometric design of the system. In this study, the SCPP was designed for 4 different chimney heights and the design was analyzed by means of a numerical analysis program. As a result of the analyzes:

- It was determined that as the height of the chimney increases, the velocity, mass flow rate, power and efficiency values increase, but the temperature difference decreases.
- Another efficiency value was defined because efficiency expressions stated in other studies were insufficient since the main reason is that the collector efficiency and solar chimney efficiency expressions are not dependent on the power to be obtained from the system.

- In order to obtain maximum power from the system, a turbine was placed in the narrow section of the chimney.
- The highest velocity, mass flow rate, power and efficiency values obtained from the SSCP are found to be 21.46 m/s, 596.22 kg/s, 81.38 kW and 9.25%, respectively.

NOMENCLATURE

CFD	= computational fluid dynamics
SCPP	= solar chimney power plant
B	= Betz constant

SYMBOLS

c_p	= specific heat (kJ/kgK)
\dot{m}	= mass flow rate kg/s
P	= pressure (Pa) and power (W)
T	= temperature (K)
T_0	= ambient temperature (K)
v	= velocity (m/s)
ρ	= intensity (kg/m ³)
η	= efficiency (%)
k	= kinetic energy
ε	= rate of dissipation of kinetic energy
I	= solar radiation (W/m ²)

SUBSCRIPTS

in	= inlet
out	= outlet
col	= collector
$chim$	= chimney

REFERENCES

- Al-Kayiem, H. H., Aurybi, M. A., Gilani, S. I., Ismaeel, A. A., & Mohammad, S. T. (2019). Performance evaluation of hybrid solar chimney for uninterrupted power generation. *Energy*, 166, 490-505.
- Cable, M. (2009). An evaluation of turbulence models for the numerical study of forced and natural convective flow in Atria (Doctoral dissertation, Queen's University), 25-38.
- Das, P., & Chandramohan, V. P. (2019). Computational study on the effect of collector cover inclination angle, absorber plate diameter and chimney height on flow and performance parameters of solar updraft tower (SUT) plant. *Energy*, 172, 366-379.
- Das, P., & Chandramohan, V. P. (2020). 3D numerical study on estimating flow and performance parameters of solar updraft tower (SUT) plant: Impact of divergent angle of chimney, ambient temperature, solar flux and turbine efficiency. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120353.
- Haaf, W., Friedrich, K., Mayr, G., & Schlaich, J. (1983). Solar chimneys part I: principle and construction of the pilot plant in Manzanares. *International Journal of Solar Energy*, 2(1), 3-20.
- Karami, S., Roghabadi, F. A., Maleki, M., Ahmadi, V., & Sadrameli, S. M. (2021). Materials and structures engineering of sun-light absorbers for efficient direct solar steam generation. *Solar Energy*, 225, 747-772.

- Kebabsa, H., Lounici, M. S., Lebbi, M., & Daimallah, A. (2020). Thermo-hydrodynamic behavior of an innovative solar chimney. *Renewable Energy*, 145, 2074-2090.
- Koç, A., Yağlı, H., Bilgic, H. H., Koç, Y., & Özdemir, A. (2020). Performance analysis of a novel organic fluid filled regenerative heat exchanger used heat recovery ventilation (OHeX-HRV) system. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 41, 100787.
- Mert, İ., Bilgic, H. H., Yağlı, H., & Koç, Y. (2020). Deep neural network approach to estimation of power production for an organic Rankine cycle system. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(12), 1-16.
- Nasraoui, H., Driss, Z., & Kchaou, H. (2020). Novel collector design for enhancing the performance of solar chimney power plant. *Renewable Energy*, 145, 1658-1671.
- Nassar, Y. F., Abdunnabi, M. J., Sbeta, M. N., Hafez, A. A., Amer, K. A., Ahmed, A. Y., & Belgasim, B. (2021). Dynamic analysis and sizing optimization of a pumped hydroelectric storage-integrated hybrid PV/Wind system: A case study. *Energy Conversion and Management*, 229, 113744.
- Roy, D., & Samanta, S. (2021). Development and multiobjective optimization of a novel trigeneration system based on biomass energy. *Energy Conversion and Management*, 240, 114248.
- Setia, G. A., Zaen, Z. Z., Haz, F., Iskandar, H. R., Winanti, N., & Hidayat, M. R. (2021, October). Optimization of the Hybrid Power Plant Design (PV-Wind) for Residential Load. In 2021 3rd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS) (pp. 227-231). IEEE.
- Shih, T. H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z., & Zhu, J. (1995). A New Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows-Model Development and Validation.-*Computers Fluids*. 24 (3). 227-238.
- Singh, A. P., Kumar, A., & Singh, O. P. (2020). Performance enhancement strategies of a hybrid solar chimney power plant integrated with photovoltaic panel. *Energy Conversion and Management*, 218, 113020.
- Sivaram, P. M., Mande, A. B., Premalatha, M., & Arunagiri, A. (2020). Investigation on a building-integrated passive solar energy technology for air ventilation, clean water and power. *Energy Conversion and Management*, 211, 112739.
- Tan, J. D., Chang, C. C. W., Bhuiyan, M. A. S., Nisa'Minhad, K., & Ali, K. (2022). Advancements of wind energy conversion systems for low-wind urban environments: A review. *Energy Reports*, 8, 3406-3414.
- Xu, Y., & Zhou, X. (2018). Performance of divergent-chimney solar power plants. *Solar Energy*, 170, 379-387.
- Zuo, L., Liu, Z., Ding, L., Qu, N., Dai, P., Xu, B., & Yuan, Y. (2020). Performance analysis of a wind supercharging solar chimney power plant combined with thermal plant for power and freshwater generation. *Energy Conversion and Management*, 204, 112282.



OBSERVER BASED SLIDING MODE CONTROLLER DESIGN FOR POSITION CONTROL OF A SERVO SYSTEM HAVING UNCERTAINTIES AND DISTURBANCES

Ümit ÖNEN

Necmettin Erbakan University, Engineering Faculty, Mekatronics Engineering Department, Konya, TURKIYE
uonen@erbakan.edu.tr

(Geliş/Received: 14.04.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 16.06.2022)

ABSTRACT: Servo systems are used extensively in many industrial applications that require precise position control. However, parameter uncertainties, matched and unmatched disturbances encountered in most of these applications adversely affect the controller performance. Therefore, in industrial control applications, robustness is at least as important as precision. In this study, an Extended State Observer-based Sliding Mode Controller (GDGKKK) design is presented for precise position control of a rotary servo system having parameter uncertainties and disturbance input. The performance of the proposed controller has been tested by performing simulation studies for five different uncertainty and disturbance input scenarios and compared with the traditional Sliding Mode Control (SMC) and Proportional Derivative (PD) control to evaluate its effectiveness. The mathematical model of the Quanser SRV02 rotary servo unit was used in the simulation studies in MATLAB/Simulink software. The simulation results show that the PD control is very sensitive to load changes and disturbances and while the traditional SMC control is insensitive to load changes and matched disturbances, it is sensitive to mismatched disturbances. On the other hand, the results clearly showed that the proposed GDGKKK controller offers extremely successful disturbance rejection performance against both load changes and matched and unmatched disturbances.

Keywords: Observer, Robust Control, Sliding Mode Control (SMC), Position Control, Servomotor

Belirsizlik ve Bozuculara Sahip Bir Servo Sistemin Konum Kontrolü İçin Gözlemci Tabanlı Kayan Kipli Kontrolcü Tasarımı

ÖZ: Servo sistemler, hassas konum kontrolü gerektiren birçok endüstriyel uygulamada yoğun olarak kullanılmaktadır. Ancak bu uygulamaların çoğunda karşılaşılan parametre belirsizlikleri, eşleşen ve eşleşmeyen bozucu etkenler, kontrolcü performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Dolayısıyla endüstriyel kontrol uygulamalarında gürbüzlükte en az hassasiyet kadar önem taşımaktadır. Bu çalışmada, parametre belirsizlikleri ve bozucu girişe sahip bir döner servo sistemin hassas pozisyon kontrolü için Genişletilmiş Durum Gözlemcisine dayalı Kayan Kipli Kontrolcü (GDGKKK) tasarımı sunulmuştur. Önerilen kontrolcünün performansı, beş farklı belirsizlik ve bozucu giriş senaryosu için benzetim çalışmaları yapılarak test edilmiş ve etkinliğinin değerlendirilebilmesi için klasik Kayan Kipli Kontrol (SMC) ve Oransal Türevsel (PD) kontrol ile kıyaslanmıştır. MATLAB/Simulink yazılımında benzetim çalışmalarında Quanser SRV02 döner servo ünitesine ait matematiksel model kullanılmıştır. Benzetim sonuçları, PD kontrolün yük değişimlerine ve bozucu girişlere karşı oldukça duyarlı olduğunu, klasik SMC kontrolün ise yük değişimleri ve eşleşen bozuculara karşı dayanıklı olmakla birlikte eşleşmeyen bozuculara karşı duyarlı olduğunu göstermiştir. Diğer yandan sonuçlar, önerilen GDGKKK kontrolcünün hem yük değişimlerine hem de eşleşen ve eşleşmeyen bozuculara karşı son derece başarılı bir bozucu reddetme performansı sunduğunu açıkça göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Gözlemci, Gürbüz Kontrol, Kayan Kipli Kontrol (KKK), Konum kontrolü, Servomotor

1. INTRODUCTION

Servo systems are widely used in many fields of industry, especially in applications requiring precise motion control due to their advantages such as light weight and small structure, high performance and efficiency, high torque/inertia ratio, reliability and low noise. Traditional PID control has been used intensively in servo motor control due to its simple structure and easy application. The PID controller can guarantee a robust and suitable control performance if an accurate dynamic model and detailed information about the disturbances can be obtained (Cheon *et al.*, 2004). However, in most practical applications, servo systems have kinds of disturbances and uncertainties because of nonlinear friction, measurement noise, load variations, external disturbances, etc. (Wang *et al.*, 2017). The presence of the system uncertainties, parameter changes and external disturbances results in poor control performance for conventional linear control methods.

In recent years, researchers have focused on servo systems affected by uncertainties and disturbances and they have proposed many different control methods to increase the robustness of the systems. Among all these control methods, SMC has stand out as one of the most effective methods in terms of robustness due to its invariance property against the external disturbances and parameter variations. SMC uses a discontinuous control action to force the state trajectories of the system to a predefined sliding surface. After the system states reach the sliding surface, the stability and dynamic characteristics of the system is independent of certain perturbations including external disturbances and only depend on the sliding surface parameters.

Although the SMC provides fast response and good robustness features, it has some disadvantages such as chattering and sensitivity to mismatched disturbances. Chattering is the high frequency oscillations that occur near the sliding surface due to the discontinuous control law. In addition to decreasing control performance, chattering can cause actuator failure in practical applications. Researchers have proposed many methods for eliminating or reducing the effect of chattering. A novel exponential reaching law for the conventional SMC was presented in (Wang *et al.*, 2013), a boundary layer around the switching surface which replace the discontinuous control law with a continuous one is used in (Kachroo and Tomizuka, 1996; Baik *et al.*, 2000), second order and higher-order SMC methods are used in (Bartolini *et al.*, 1998; Levant, 2003) and low-pass filtering is used in (Tseng and Chen, 2010). Fuzzy-logic based SMC (Ha *et al.*, 2001) and Nonsingular Terminal SMC (Zheng *et al.*, 2014) are some other methods proposed to avoid chattering by using continuous functions instead of classical switching functions. In order to ensure robustness, the switching gain must be selected to be greater than the upper bound of the disturbance. But in most of the practical applications, it is difficult to measure or estimate the upper bound of the disturbance and so the switching gain could be much large. Because of the large switching gain cause large chattering, adaptive SMC and neural-network based SMC methods are used to tune proper switching gains in (Bao *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2009).

Besides the chattering phenomenon, the most of the existing traditional SMC approaches are insensitive only to matched disturbances and cannot attenuate mismatched disturbances which act in a different channel than the control input, effectively. Some researchers have proposed integral SMC and global SMC methods in (Rubagotti *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2014) to improve the disturbance rejection performance of the SMC for the systems effected of matched and mismatched disturbances. Some researchers have combined SMC control with other robust control techniques such as backstepping in (Li and Hu, 2011) and adaptive control in (Chang, 2009).

On the other hand, disturbance observer-based SMC is one of the most effective approach used to deal with mismatched disturbances. Besides increasing the robustness, it can also reduce the chattering since the switching gain can be reduced to small values after the disturbance is estimated and compensated in control input.

In (Cheon *et al.*, 2004) a disturbance estimator-based SMC controller was proposed for position control of AC servomotor subjected to external disturbance, in (Shao *et al.*, 2021) recursive SMC combined with an adaptive disturbance observer was used for position control of a linear motor deteriorated by payload variations, friction and external disturbances, a nonlinear disturbance observer-based SMC was used for

systems with matched and mismatched uncertainties in (Hou *et al.*, 2017). A SMC based on an unknown system dynamics estimator was proposed in (Wang *et al.*, 2020) for a servomechanism having unknown system dynamics. A nonlinear disturbance observer based terminal SMC was proposed for nonlinear systems subjected to both matched and mismatched disturbances in (Nguyen *et al.*, 2021) and Extended state observer-based SMC was used for a class of nonlinear systems subjected to matched and mismatched disturbance in (Shi *et al.*, 2018). All these studies show that the disturbance observers reduce the chattering problem as well as increasing the disturbance rejection property of the SMC control effectively.

In this study ESO based SMC control of a rotary servo system having parameter uncertainties and disturbances is realized. While traditional SMC control is a robust control method against parameter changes and matched disturbances, it is sensitive to mismatched disturbances. So, in the proposed control scheme, an ESO was added to the control scheme to improve the disturbance rejection capability of the SMC control against mismatched disturbances. The performance of the proposed controller was tested on simulation model of Quanser SRV02 servo unit for five different conditions consisted of different uncertainties and disturbances and compared with the traditional SMC and PD control in order to evaluate its effectiveness. The results showed that the proposed ESOSMC controller provided much better performance against load variations, matched and mismatched disturbances compared to both PD and traditional SMC control.

2. MATHEMATICAL MODEL OF THE ROTARY SERVO SYSTEM

In this study, mathematical model of SRV02 rotary servo base unit of Quanser Inc. was used as simulation model. Schematic of the DC motor armature circuit and the gearbox of the SRV02 is shown in Fig. 1.

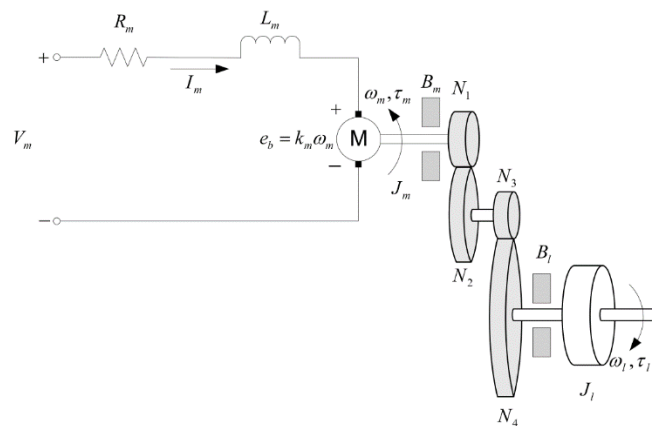


Figure 1. Armature circuit and gear train of the SRV02 rotary servo system

The equation of the armature circuit can be obtained by using Kirchoff's Voltage Law as

$$V_m(t) - R_m I_m(t) - k_m \omega_m(t) = 0 \quad (1)$$

where $V_m(t)$, R_m and $I_m(t)$ is the input voltage, armature resistance and armature current of the motor respectively, $\omega_m(t)$ is the angular velocity of the motor shaft and k_m is the back-emf constant of the motor. Motor inductance L_m is neglected since it is much less than resistance. The equation of motion of the load can be derived by using Newton's Second Law of Motion as

$$J_l \frac{d\omega_l(t)}{dt} + B_l \omega_l(t) = \tau_l(t) \quad (2)$$

where J_l is the moment of inertia of the load which includes the inertia of the gearbox and the inertia of the attached external loads, B_l is the viscous friction coefficient of the load shaft, $\omega_l(t)$ is the angular velocity of the load shaft and $\tau_l(t)$ is the total torque applied on the load. The equation of motion of the motor shaft can be written as follows by the same way,

$$J_m \frac{d\omega_m(t)}{dt} + B_m \omega_m(t) + \tau_{ml}(t) = \tau_m(t) \quad (3)$$

where J_m is the moment of inertia of the motor shaft, B_m is the viscous friction acting on the motor shaft, $\tau_{ml}(t)$ is the resulting torque acting on the motor shaft from the load torque and $\tau_m(t)$ is the total motor torque. The resulting torque $\tau_{ml}(t)$ transferred from the load torque to the motor shaft can be found as follows.

$$\tau_{ml}(t) = \frac{\tau_l(t)}{\eta_g K_g} \quad (4)$$

where η_g is the gearbox efficiency and K_g is the gear ratio. The relationships between the positions and angular velocities of the load and motor shaft can be defined as follows.

$$\theta_m(t) = K_g \theta_l(t) \quad (5)$$

$$\omega_m(t) = K_g \omega_l(t) \quad (6)$$

Equation of motion of the load shaft with respect to applied motor torque can be obtained by substituting Eq. 2, 4 and 6 into Eq. 3 as follows.

$$J_{eq} \frac{d\omega_l(t)}{dt} + B_{eq} \omega_l = \eta_g K_g \tau_m(t) \quad (7)$$

In this equation, the equivalent moment of inertia J_{eq} and the equivalent damping coefficient of the motor B_{eq} can be defined as,

$$J_{eq} = \eta_g K_g^2 J_m + J_l \quad (8)$$

$$B_{eq} = \eta_g K_g^2 B_m + B_l \quad (9)$$

The relationship between the motor torque and the current can be defined as

$$\tau_m(t) = \eta_m k_t I_m(t) \quad (10)$$

where k_t is the current-torque constant and η_m is the motor efficiency. The motor torque can be expressed with respect to the input voltage $V_m(t)$ and the angular velocity of the load shaft $\omega_l(t)$ by subtracting $I_m(t)$ from Eq. (1) and substituting it in Eq. (10).

$$\tau_m(t) = \frac{\eta_m k_t (V_m(t) - k_m K_g \omega_l(t))}{R_m} \quad (11)$$

If we substitute Eq. (11) into Eq. (7), we can obtain the expression of the angular velocity of the load shaft with respect to input voltage,

$$J_{eq} \left(\frac{d}{dt} \omega_l(t) \right) + B_{eqv} \omega_l(t) = A_m V_m(t) \tag{12}$$

In this equation the total equivalent damping term B_{eqv} and the actuator gain A_m can be defined as follows.

$$B_{eqv} = \frac{\eta_g K_g^2 \eta_m k_t k_m + B_{eq} R_m}{R_m} \tag{13}$$

$$A_m = \frac{\eta_g K_g \eta_m k_t}{R_m} \tag{14}$$

In most of the practical applications of the electromechanical systems have parameter uncertainties and disturbances because of the mass variations, actuator saturation, external forces, damping, friction, sensor noises, etc. So, the system defined in Eq. (12) can be considered as

$$\ddot{\theta}_l = f(\theta, t) + \alpha u(t) + d(t) \tag{15}$$

where $\theta_l(t)$ is the load shaft angle, $u(t)$ is the control signal, α is a constant, $f(\theta, t)$ is a function of $\theta_l(t)$ and $d(t)$ is sum of the disturbance and uncertainty of the system. We assume that the total disturbance is bounded and $|d(t)| \leq D$. By defining the states and the outputs of the system as $\mathbf{x}(t) = [x_1(t) \ x_2(t)]^T = [\theta_l(t) \ \dot{\theta}_l(t)]^T$ and $\mathbf{y} = [y_1 \ y_2]^T = [x_1 \ x_2]^T$ respectively, the system given in Eq. (15) can be written as follows.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) &= f(\theta, t) + \alpha u(t) + d(t) \end{aligned} \tag{16}$$

3. SLIDING MODE CONTROL OF THE SERVO SYSTEM

Traditional SMC control scheme of the servo system is given in Fig. 2. The SMC control law consist of two parts as equivalent control and switching control. The equivalent control drives the system states to sliding surface and the switching control keeps the system states on the sliding surface.

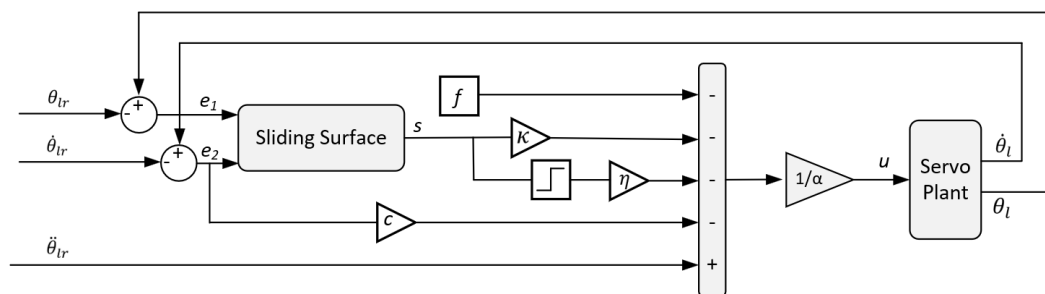


Figure 2. Traditional SMC control scheme

The total control input of the SMC is defined as;

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_{sw}(t) \tag{17}$$

where $u_{eq}(t)$ denotes the equivalent control and $u_{sw}(t)$ denotes the switching control. In order to obtain equivalent control signal $u_{eq}(t)$, the plant is described as below by ignoring the external disturbance and uncertainty.

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) &= f(\theta, t) + \alpha u(t)\end{aligned}\quad (18)$$

If the desired load shaft angle is denoted by θ_{lr} , the state error can be defined as $e_1(t) = \theta_l(t) - \theta_{lr}$. So, the error system can be written as

$$\begin{aligned}\dot{e}_1(t) &= e_2(t) \\ \dot{e}_2(t) &= f(\theta, t) - \ddot{\theta}_{lr} + \alpha u(t)\end{aligned}\quad (19)$$

Sliding surface can be selected as,

$$s(t) = c e_1(t) + e_2(t)\quad (20)$$

where, $c > 0$ is a positive constant. Derivative of the sliding surface can be obtained as

$$\dot{s}(t) = c \dot{e}_1(t) + \dot{e}_2(t) = c e_2(t) + f(\theta, t) - \ddot{\theta}_{lr} + \alpha u(t)\quad (21)$$

The equivalent control signal can be found by setting the derivative of the sliding surface equals to zero.

$$u_{eq}(t) = \frac{1}{\alpha} (\ddot{\theta}_{lr} - f(\theta, t) - c e_2(t))\quad (22)$$

Lyapunov function can be selected as,

$$V(t) = \frac{1}{2} s(t)^2\quad (23)$$

According to Lyapunov stability theory, reaching condition of the sliding mode can be defined as

$$\dot{V}(t) = s(t)\dot{s}(t) < 0\quad (24)$$

In order to satisfy the reaching condition, the switching control can be chosen as below by using exponential reaching law.

$$u_{sw}(t) = -\frac{1}{\alpha} (\kappa s(t) + \eta \operatorname{sgn}(s(t)))\quad (25)$$

where, κ and η are positive constants. Thus, total control input can be obtained by using Eq. (17) as

$$u = \frac{1}{\alpha} (\ddot{\theta}_{lr} - f(\theta, t) - c e_2(t) - \kappa s(t) - \eta \operatorname{sgn}(s(t)))\quad (26)$$

Stability Proof:

Derivative of the sliding surface can be written as

$$\dot{s}(t) = c \dot{e}_1(t) + \dot{e}_2(t) = c e_2(t) + f(\theta, t) - \ddot{\theta}_{lr} + \alpha u(t) + d(t) \quad (27)$$

If we substitute Eq (26) into Eq (27),

$$\dot{s}(t) = -\kappa s(t) - \eta \operatorname{sgn}(s(t)) + d(t) \quad (28)$$

From Eq (24),

$$\begin{aligned} s(t) \dot{s}(t) &= s(t) [-\kappa s(t) - \eta \operatorname{sgn}(s(t)) + d(t)] \\ &= -\kappa s(t)^2 - \eta s(t) \operatorname{sgn}(s(t)) + Ds(t) \\ &= -\kappa s(t)^2 - \eta |s(t)| + Ds(t) \end{aligned} \quad (29)$$

So, the system is asymptotically stable in case of $\eta > D$.

Although the SMC control has invariance property against the external disturbances and parameter changes, this feature is only valid after the sliding surface is reached. However, before reaching to the sliding surface, the invariance property cannot be guaranteed and the system performance is sensitive to perturbations. One of the best ways to overcome this problem is to use a disturbance observer. The total disturbance which including the disturbances and the parameter variations is estimated by the observer and compensated by the controller.

4. EXTENDED STATE OBSERVER BASED SLIDING MODE CONTROL OF THE SERVO SYSTEM

In this study an extended state observer (ESO) is used as a disturbance observer. The general structure of the proposed Extended State Observer Based Sliding Mode Control strategy is shown in Fig. 3.

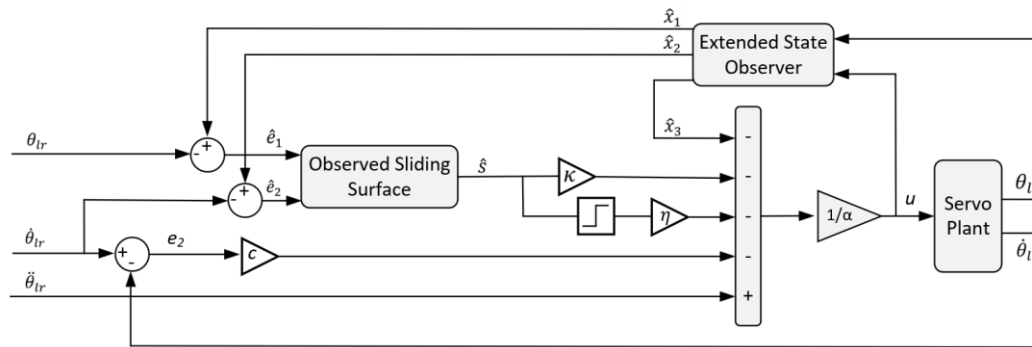


Figure 3. Extended state observer-based SMC control scheme

If the system in Eq. (12) is considered as

$$\ddot{\theta}_l = f(\theta, t) + \alpha u(t) \quad (30)$$

where, $f(\theta, t)$ is a function which includes the external disturbance and uncertain parameters, the state-space model can be written as

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) &= f(\theta, t) + \alpha u(t) \end{aligned} \quad (31)$$

If we define an additional state variable as $x_3(t) = f(\theta, t)$, the state-space model can be extended as

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1(t) &= x_2(t) \\
\dot{x}_2(t) &= f(\theta, t) + \alpha u(t) \\
\dot{x}_3(t) &= \dot{f}(\theta, t)
\end{aligned} \tag{32}$$

Now, the ESO can be designed as

$$\begin{aligned}
\dot{\hat{x}}_1(t) &= \hat{x}_2(t) - \beta_1 \epsilon(t) \\
\dot{\hat{x}}_2(t) &= \hat{x}_3(t) - \beta_2 \epsilon(t) + \alpha_0 u(t) \\
\dot{\hat{x}}_3(t) &= -\beta_3 \epsilon(t)
\end{aligned} \tag{33}$$

where $\hat{x}_1(t)$, $\hat{x}_2(t)$, $\hat{x}_3(t)$ are the approximated values of $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$ respectively, $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ are the observer gains, $\epsilon(t) = x_1(t) - \hat{x}_1(t)$ is the approximation error of $x_1(t)$. The observer gains $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ can be computed from the characteristic polynomial of the ESO. The observer pole ω_{ESO} is usually placed 3 to 10 times to the left of the closed loop pole ω_C to ensure that the observer dynamics are fast enough. The respective solutions for $\beta_{o1}, \beta_{o2}, \beta_{o3}$ are as follows.

$$\omega_{ESO} = (3 - 10)\omega_C, \quad \beta_{o1} = 3\omega_{ESO}, \quad \beta_{o2} = 3\omega_{ESO}^2, \quad \beta_{o3} = \omega_{ESO}^3 \tag{34}$$

The observing sliding surface can be defined as

$$\hat{s}(t) = c \hat{e}_1(t) + \hat{e}_2(t) \tag{35}$$

where $\hat{e}_1(t) = \hat{x}_1(t) - \theta_{lr}$ and $\hat{e}_2(t) = \hat{x}_2(t) - \dot{\theta}_{lr}$. We can select the control signal as

$$u = \frac{1}{\alpha} (\ddot{\theta}_{lr} - \hat{x}_3(t) - c e_2(t) - \kappa \hat{s}(t) - \eta \operatorname{sgn}(\hat{s}(t))) \tag{36}$$

Stability Proof:

Sliding surface for the system given in Eq. (31) can be selected as,

$$s(t) = c e_1(t) + e_2(t) \tag{37}$$

Derivative of the sliding surface is,

$$\dot{s}(t) = c \dot{e}_1(t) + \dot{e}_2(t) = c e_2(t) + f(\theta, t) - \ddot{\theta}_{lr} + \alpha u(t) \tag{38}$$

If we substitute Eq. (36) into Eq. (38) and Eq. (38) into Eq. (24),

$$\begin{aligned}
\dot{V}(t) &= s[f(\theta, t) - \hat{x}_3(t) + c(e_2(t) - \hat{e}_2(t) - \kappa \hat{s}(t) - \eta \operatorname{sgn}(\hat{s}(t)))] \\
&= (\hat{s} + s - \hat{s})[f(\theta, t) - \hat{x}_3(t) + c(e_2(t) - \hat{e}_2(t) - \kappa \hat{s}(t) - \eta \operatorname{sgn}(\hat{s}(t)))] \\
&= (|f(\theta, t) - \hat{x}_3(t)| + c|e_2(t) - \hat{e}_2(t)|)|\hat{s}(t)| \\
&\quad + (|f(\theta, t) - \hat{x}_3(t)| + c|e_2(t) - \hat{e}_2(t)|)|s(t) - \hat{s}(t)| \\
&\quad - \hat{s}(t) \left[\kappa (\hat{s}(t) + \eta \operatorname{sgn}(\hat{s}(t))) \right] - |s(t) - \hat{s}(t)| \left[\kappa (\hat{s}(t) + \eta \operatorname{sgn}(\hat{s}(t))) \right]
\end{aligned} \tag{39}$$

Due to convergence of the ESO,

$$(|f(\theta, t) - \hat{x}_3(t)| + c|e_2(t) - \hat{e}_2(t)|)|\hat{s}(t)| \tag{40}$$

$$+ (|f(\theta, t) - \hat{x}_3(t)| + c|e_2(t) - \hat{e}_2(t)|) |s(t) - \hat{s}(t)| - |s(t) - \hat{s}(t)| \left[\kappa (\hat{s}(t) + \eta \operatorname{sgn}(\hat{s}(t))) \right] \cong 0$$

is bounded and close to zero. So,

$$\dot{V}(t) = -\hat{s}(t) \left(\kappa (\hat{s}(t) + \eta \operatorname{sgn}(\hat{s}(t))) \right) = -\kappa \hat{s}(t)^2 - \eta |\hat{s}(t)| < 0 \quad (41)$$

5. RESULTS AND DISCUSSION

The performance of the proposed ESOSMC controller was examined for five different conditions according to different disturbance inputs affecting the system. The control results of the ESOSMC are compared with the traditional PD and SMC control results to evaluate its effectiveness. A square signal with 0.4 rad amplitude and 0.4 Hz frequency was used as reference input. The parameters of the SRV02 rotary servo unit are given in Table 1 and the parameters of the PID controller are taken as $k_p = 1.79$, $k_d = 4.66 \times 10^{-4}$ and $k_i = 0$. These values are the optimum values determined by the manufacturer. The controller parameters are chosen as, $c = 85$, $\eta = 30$ and $\kappa = 20$ for the SMC and $c = 85$, $\eta = 1$, $\kappa = 20$ and $\omega_o = 100$ for the ESOSMC. The signum function in the control signal has been replaced by the saturation function to reduce the chattering.

Table 1. Parameters of the SRV02 rotary servo unit

Symbols	Definitions	Value
J_m	Moment of inertia of the motor shaft	4.6×10^{-07} (kgm ²)
J_l	Moment of inertia of the load shaft	1.6×10^{-05} (kgm ²)
J_{eq}	Equivalent moment of inertia	9.8×10^{-05} (kgm ²)
B_{eq}	Equivalent Viscous Damping Coefficient	15×10^{-05} (Nms/rad)
K_g	Gear ratio	14
k_t	Current-torque constant	0.0077 (Nm/A)
k_m	Back-emf constant	0.0077 (Vs/rad)
η_g	Gearbox efficiency	0.9
η_m	Motor efficiency	0.69
R_m	Armature resistance	2.6 (ohm)

1st condition: The performances of the controllers were evaluated under ideal system conditions without parameter variations and disturbances. The controller responses and the control voltages are given in Fig.4 and Fig.5 respectively. As seen in Figure 4, ESOSMC gives better results than other controllers in terms of response speed. Also, an overshoot occurred in the PD control response and a small steady-state error was observed in the traditional SMC response.

2nd condition: The equivalent moment of inertia of the servo system was increased by 500% by connecting a load to the motor shaft in order to examine the robustness of the controllers against the parameter variations. The controller responses and the control voltages are given in Fig.6 and Fig.7 respectively. Accordingly, it is seen that the SMC and the ESOSMC are completely insensitive to parameter variations, while the PD controller is greatly affected and its response shows large deviations from the desired response.

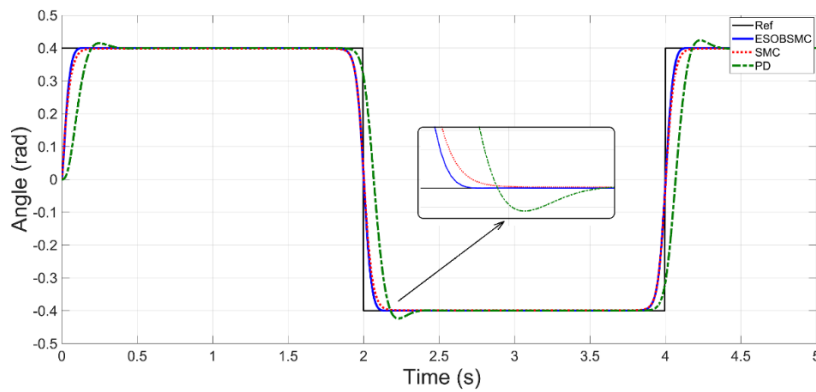


Figure 4. Controller responses in case of ideal conditions (no parameter variations or disturbance)

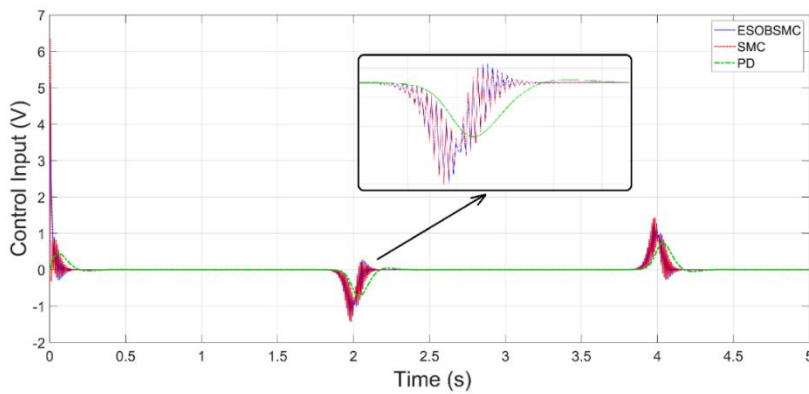


Figure 5. Controller voltages in case of ideal conditions (no parameter variations or disturbance)

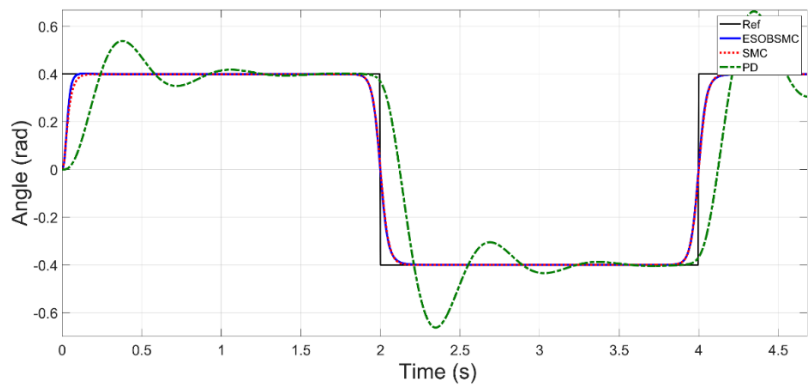


Figure 6. Controller responses in case the equivalent moment of inertia is increased by 500%

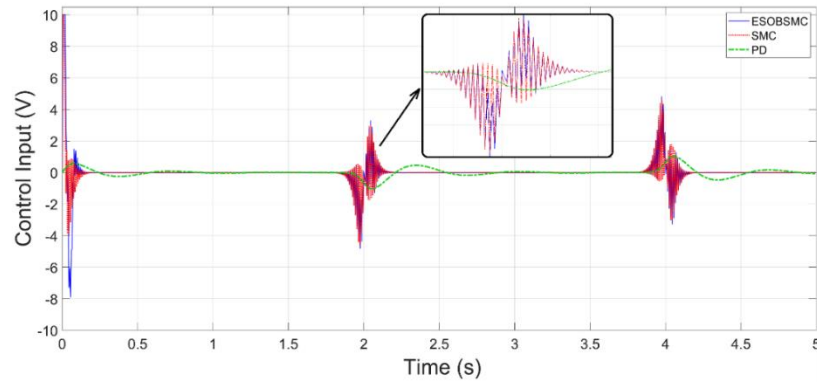


Figure 7. Controller voltages in case the equivalent moment of inertia is increased by 500%

3rd condition: A time dependent $d_1(t) = 25 \sin(5t)$ disturbance input was applied to the input channel of the system in order to examine the disturbance rejection performances of the controllers against the matched disturbances. The controller responses and the control voltages are given in Fig.8 and Fig.9 respectively. It can be clearly seen from Fig. 8 that the PD control is highly sensitive to matched disturbances and its response shows large deviations from the desired response. As mentioned earlier, the traditional SMC control has invariance property against the matching disturbances. In accordance with this, the SMC control has generally given a successful response against the matched disturbance except some deviations shown in the zoomed part of the Fig. 8. On the other hand, it is also seen that the proposed ESOSMC controller has provided a better disturbance rejection ability against the matched disturbances than SMC.

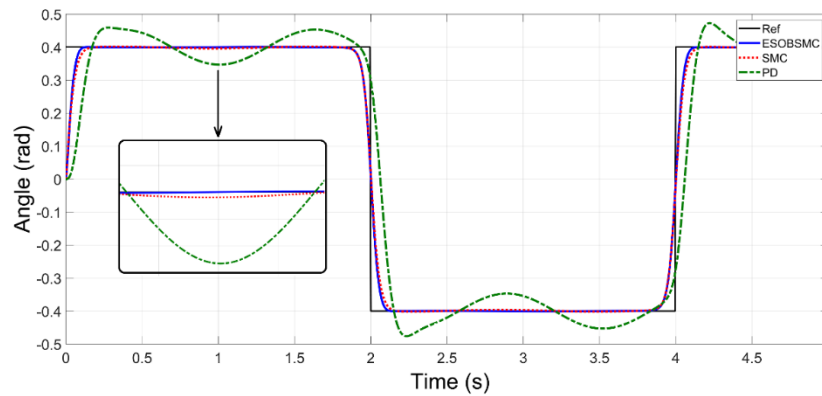


Figure 8. Controller responses in case of $d_1 = 25 \sin(5t)$ matched disturbance input

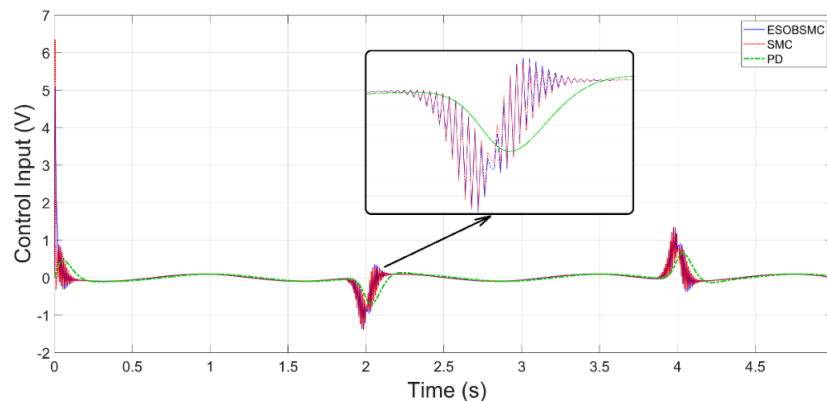


Figure 9. Controller voltages in case of $d_1 = 25 \sin(5t)$ matched disturbance input

4th condition: A time dependent $d_1(t) = 0.5 \sin(5t)$ disturbance input was applied directly to system in order to examine the disturbance rejection performances of the controllers against the mismatched disturbances. The controller responses and the control voltages are given in Fig. 10 and Fig. 11 respectively. As mentioned earlier, although the traditional SMC control is insensitive to matched disturbances, this feature is not valid to mismatched disturbances. It can be seen from Fig. 10; both the PD and SMC control are extremely sensitive to mismatched disturbances and the controller responses have deviated considerably from the desired response. On the other hand, it can be clearly seen that the proposed ESOSMC controller is completely insensitive to mismatched disturbances and it has provided a perfect disturbance rejection ability.

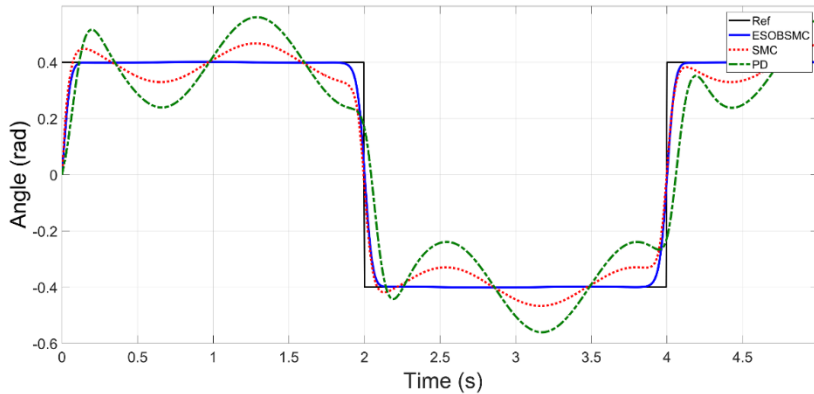


Figure 10. Controller responses in case of $d_2 = 0.5 \sin(5t)$ mismatched disturbance input

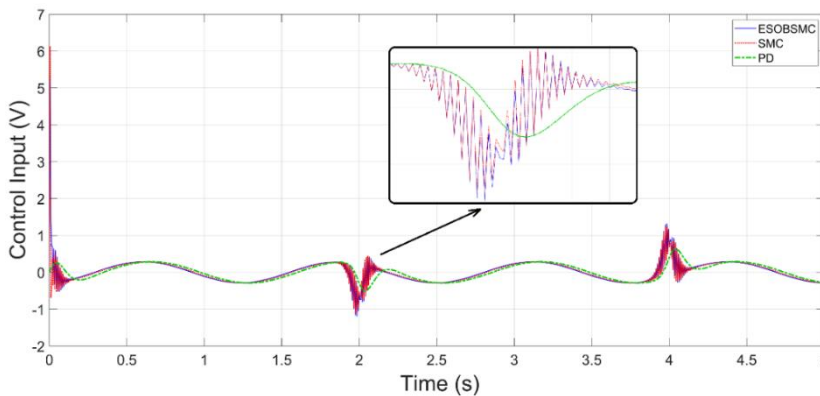


Figure 11. Controller voltages in case of $d_2 = 0.5 \sin(5t)$ mismatched disturbance input

5th condition: As the last condition, the parameter variation and the matched and unmatched disturbance inputs given in the previous conditions were applied to the system at the same time. The controller responses and the control voltages are given in Fig. 12 and Fig. 13 respectively. It is clearly seen from Figure 12 that the proposed ESOSMC controller can offer a superior performance compared to other controllers in terms of both response speed and disturbance rejection, even if parameter changes and matched and unmatched disturbances affect the system at the same time.

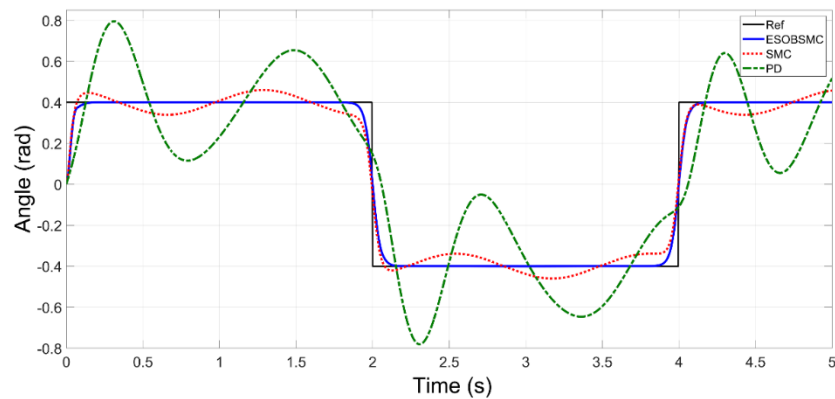


Figure 12. Controller responses in case of increasing the equivalent moment of inertia by 500% and at the same time applying $d_1 = 25 \sin(5t)$ matched disturbance and $d_2 = 0.5 \sin(5t)$ unmatched disturbance inputs to the system

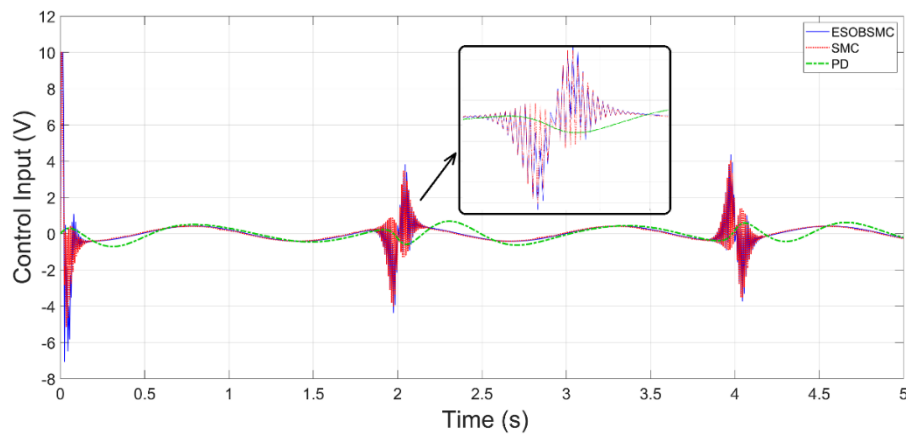


Figure 13. Controller voltages in case of increasing the equivalent moment of inertia by 500% and at the same time applying $d_1 = 25 \sin(5t)$ matched disturbance and $d_2 = 0.5 \sin(5t)$ unmatched disturbance inputs to the system

On the other hand, while the PD control provides a smooth control signal for all conditions, both SMC and the proposed ESOSMC controllers showed chattering, although it is not critical level. The amount of the chattering in control signal was slightly reduced by using the saturation function instead of the sign function, but it is seen that the extended state observer cannot provide a significant improvement in the chattering phenomenon.

6. CONCLUSION

In this study, extended state observer-based sliding mode control scheme has been proposed for precise position control of a rotary servo system. The proposed control scheme is tested via simulation studies for five different conditions consisted of different uncertainties and disturbances and its performance were compared with the PD controller and the traditional SMC controller. The simulation results showed that the PD control is sensitive to parameter changes and disturbances while the SMC control is sensitive to mismatched disturbances. However, it has been seen that the proposed control scheme is much more successful than the PD and SMC control in terms of both the response speed and the ability to reject disturbances including mismatched disturbances.

7. REFERENCES

- Baik, I. C., Kim, K. H., & Youn, M. J., 2000, "Robust nonlinear speed control of PM synchronous motor using boundary layer integral sliding mode control technique", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 8(1), 47-54.
- Bao, G., Zhang, Q., Lu, J., Xun, Y., & Yang, Q., 2010, "Sliding-mode position control of robot joint based on self-adaptive parameters adjusting", In *2010 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics* (pp. 478-483). IEEE.
- Bartolini, G., Ferrara, A., & Usai, E., 1998, "Chattering avoidance by second-order sliding mode control", *IEEE Transactions on automatic control*, 43(2), 241-246.
- Chang, Y., 2009, "Adaptive sliding mode control of multi-input nonlinear systems with perturbations to achieve asymptotical stability", *IEEE Transactions on automatic control*, 54(12), 2863-2869.
- Cheon, J. W., Choi, S. B., Song, H. J., & Ham, J. H., 2004, "Position control of an AC servo motor using sliding mode controller with disturbance estimator", *International journal of precision engineering and manufacturing*, 5(4), 14-20.
- Ha, Q. P., Nguyen, Q. H., Rye, D. C., & Durrant-Whyte, H. F., 2001, "Fuzzy sliding-mode controllers with applications", *IEEE Transactions on industrial electronics*, 48(1), 38-46.
- Hou, L., Wang, L., & Wang, H., 2017, "SMC for systems with matched and mismatched uncertainties and disturbances based on NDOB", *Acta Automatica Sinica*, 43(7), 1257-1264.
- Kachroo, P., & Tomizuka, M., 1996, "Chattering reduction and error convergence in the sliding-mode control of a class of nonlinear systems", *IEEE Transactions on automatic control*, 41(7), 1063-1068.
- Levant, A., 2003, "Higher-order sliding modes, differentiation and output-feedback control", *International journal of Control*, 76(9-10), 924-941.
- Li, H. Y., & Hu, Y. A., 2011, "Robust sliding-mode backstepping design for synchronization control of cross-strict feedback hyperchaotic systems with unmatched uncertainties", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 16(10), 3904-3913.
- Liu, X., Wu, Y., Deng, Y., & Xiao, S., 2014, "A global sliding mode controller for missile electromechanical actuator servo system", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 228(7), 1095-1104.
- Nguyen, D. G., Tran, D. T., & Ahn, K. K., 2021, "Disturbance Observer-Based Chattering-Attenuated Terminal Sliding Mode Control for Nonlinear Systems Subject to Matched and Mismatched Disturbances", *Applied Sciences*, 11(17), 8158.
- Rubagotti, M., Estrada, A., Castañón, F., Ferrara, A., & Fridman, L., 2011, "Integral sliding mode control for nonlinear systems with matched and unmatched perturbations", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 56(11), 2699-2704.
- Shao, K., Zheng, J., Wang, H., Xu, F., Wang, X., & Liang, B., 2021, "Recursive sliding mode control with adaptive disturbance observer for a linear motor positioner", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 146, 107014.
- Shi, S. L., Li, J. X., & Fang, Y. M., 2018, "Extended-state-observer-based chattering free sliding mode control for nonlinear systems with mismatched disturbance", *IEEE Access*, 6, 22952-22957.
- Tseng, M. L., & Chen, M. S., 2010, "Chattering reduction of sliding mode control by low-pass filtering the control signal", *Asian Journal of control*, 12(3), 392-398.
- Wang, A., Jia, X., & Dong, S., 2013, "A new exponential reaching law of sliding mode control to improve performance of permanent magnet synchronous motor", *IEEE Transactions on Magnetics*, 49(5), 2409-2412.
- Wang, H., Li, S., Lan, Q., Zhao, Z., & Zhou, X., 2017, "Continuous terminal sliding mode control with extended state observer for PMSM speed regulation system", *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 39(8), 1195-1204.
- Wang, L., Chai, T., & Zhai, L., 2009, "Neural-network-based terminal sliding-mode control of robotic manipulators including actuator dynamics", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(9), 3296-3304.

- Wang, S., Tao, L., Chen, Q., Na, J., & Ren, X., 2020, "USDE-based sliding mode control for servo mechanisms with unknown system dynamics", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 25(2), 1056-1066.
- Zheng, J., Wang, H., Man, Z., Jin, J., & Fu, M., 2014, "Robust motion control of a linear motor positioner using fast nonsingular terminal sliding mode", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(4), 1743-1752.



GNSS KOD (PSEUDORANGE) ÖLÇÜLERİ İLE TEK NOKTA KONUM BELİRLEME YAZILIMI: KTUN_SPP

¹Emre AYSO , ²Muzaffer KAHVECİ 

*Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Konya,
TÜRKİYE*

¹eayso@ktun.edu.tr, ²mkahveci@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 07.05.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 27.06.2022)

ÖZ: Günümüzde tek frekanslı GNSS alıcıları ile konum belirleme uygulaması birçok alanda (savunma sanayi, navigasyon cihazları, akıllı kişisel cihazlar vb.) yoğun şekilde tercih edilmektedir. Diğer taraftan, yüksek doğruluk isteyen mühendislik amaçlı uygulamalarda (haritacılık, deprem tahmini ve deformasyon analizi çalışmaları, sayısal hava tahmini vb.) genel olarak çok frekanslı alıcılar ve faz gözlemleri tercih edilmektedir. Dolayısıyla, günümüzde artık akıllı telefonlar, akıllı saatler ya da konum tabanlı her türlü gerçek zamanlı navigasyon hizmetleri düşük maliyetli alıcılarla donatılmaktadır. Bu bağlamda tek frekanslı GNSS alıcılarıyla yalnızca sivil (C/A:Coarse Acquisition) kod gözlemlerinin kullanıldığı Tek Nokta (Mutlak) Konum Belirleme (SPP: Single Point Positioning) tekniğinden elde edilen doğruluğun iyileştirilmesi gerekliliği söz konusu alanlarda oldukça önemli hale gelmiştir.

Tek frekansta kod ölçüleri ile mutlak konum belirleme uygulamalarının gittikçe artan kullanım alanları nedeniyle, bu makalenin temelini oluşturan ve makale yazarına ait bir yüksek lisans tez çalışması kapsamında KTUN_SPP (Konya Teknik Üniversitesi_Tek Nokta Konum Belirleme) isimli GPS+Galileo özellikli bir yazılım hazırlanmıştır. Yazılım kapsamında GPS ve Galileo uydularına ait L1 ve E1 frekanslarındaki C1 kod gözlemleri kullanılarak tek nokta konum belirleme ile elde edilebilecek doğruluklar araştırılmıştır. Ayrıca kullanıcı dostu bir ara yüz tasarlanarak kullanıcıya dilediği hesaplama senaryolarını gerçekleştirebilme olanağı da sunulmaktadır. KTUN_SPP yazılımının performansını test etmek amacıyla 7 adet IGS istasyonuna ait 24 saatlik veri setleri kullanılarak GPS, Galileo ve GPS+Galileo SPP senaryoları oluşturulmuş, elde edilen sonuçlar global ölçekte gerçek zamanlı konum belirleme için kullanılan "CenterPoint RTX Post-Processing" hizmetinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: GPS, Galileo, KTUN_SPP

Single Point Positioning Software with GNSS Code (Pseudorange) Observations: KTUN_SPP

ABSTRACT: Nowadays, positioning application with single-frequency GNSS receivers is heavily preferred in many areas such as defense industry, navigation devices, smart personal devices, etc. On the other hand, multi-frequency receivers and phase observations are generally preferred in engineering applications that require high accuracy such as cartography, earthquake prediction and deformation analysis studies, numerical weather forecasting, etc. Therefore, today, smart phones, smart watches or any location-based real-time navigation services are equipped with low-cost receivers. In this context, it has become very important to improve the accuracy obtained from the Single Point Positioning (SPP) technique, where civilian (C/A: Coarse Acquisition) code observations are used.

Due to the increasing use of single point positioning using single-frequency code observations, a GPS+Galileo-enabled software named KTUN_SPP (Konya Technical University_Single Point Positioning) has been prepared within the scope of a master's thesis that forms the basis of this article.

Within the scope of the software, the accuracies that can be obtained by single point positioning were investigated by using C1 code observations at L1 and E1 frequencies of GPS and Galileo satellites. In addition, a user-friendly interface is designed to provide the user with the opportunity to perform any computation scenarios they wish. In order to test the performance of the KTUN_SPP software, GPS, Galileo and GPS+Galileo SPP scenarios were applied using 24-hour data sets from 7 IGS stations. And the results were compared with the results obtained from the "CenterPoint RTX Post-Processing" service used for real-time location determination on a global scale.

Keywords: GPS, Galileo, KTUN_SPP

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yirminci yüzyılın başlarında uzay çalışmalarındaki önemli gelişmeler 1980'li yıllarda Global Konum Belirleme Sistemi'nin (GPS: Global Positioning System) günlük yaşama girmesini sağlamıştır. GPS'in sivil amaçlı kullanıma açıldığı bu ilk yıllarda gerçek zamanlı üç boyutlu konum belirlemede C/A (Coarse Acquisition/ Clear Access) kod gözlemleri ile yaklaşık 150-300 metre, askeri kod olarak nitelendirilen P (Protected/Precise) kod ile ise yaklaşık 15-30 metre doğruluk elde edilebilmekteydi. Bu şekilde kod gözlemleri kullanılarak tek bir noktada eş zamanlı en az dört uyduya yapılan gözlemlerle gerçek zamanlı ve üç boyutlu konum belirleme yöntemine tek nokta (mutlak) konum belirleme adı verilmektedir (Kahveci ve Yıldız 2022). 1980'li yıllarda elde edilen bu doğrulukların günümüz standartlarına göre bu kadar düşük olmasının en önemli nedenleri, kullanılan yörünge bilgisinin (C/A kod için yayın efemerisi ve P kod için NGS hassas efemerisi) doğruluğunun oldukça düşük olması ve atmosferik etkilerin çok genel modellerle giderilmesi veya hiç dikkate alınmaması olarak sayılabilir. Aradan geçen zaman içerisinde, özellikle Avrupalı bilim insanlarının da bu konuda çalışmalara dahil olmasıyla GPS gözlemlerini etkileyen hata kaynakları daha iyi modellenmeye başlamış, yörünge bilgileri ise çok daha yüksek (günümüzde IGS yayın efemerisi ~100 cm ve IGS Final ~2,5 cm (IGS, 2022)) doğruluklarla belirlenmeye başlanmış ve böylece GPS mutlak konum belirleme ile elde edilen gerçek zamanlı doğruluklar 1990'lı yılların sonlarından itibaren kod gözlemleri için 20-30 metrelere yükselmiştir. Başlangıçta navigasyon amaçlı kullanım için geliştirilmiş olan GPS sisteminin konum doğrulukları arttıkça, bilim insanları bu olanağın başta jeodezi olmak üzere diğer yer bilimlerinde de kullanılmasının olanaklarını araştırmaya başlamışlardır. Bu amaçla, yüksek doğruluk isteyen mühendislik çalışmalarında faz gözlemlerinin kullanılması üzerine yoğunlaşmıştır. Üç boyutlu konum belirlemede uzun gözlem süreleri ile statik ölçüler yapılarak kaydedilen faz gözlemi ve ölçü sonrası büro hesaplamaları ile elde edilen doğruluklar hata kaynaklarının giderilebilme oranına ve doğruluğuna bağlı olarak 1-10 cm arasında değişmekteydi. Zaman içerisinde teknoloji ve kaynakları yeterli diğer ülkeler tarafından geliştirilmiş konum belirleme sistemleri (Rus GLONASS, AB Galileo, Çin Beidou vb.) ile GNSS genel tanımı kullanılmaya başlamıştır (Kahveci, 2017). Bu ülkelerin konum belirleme ve navigasyon sistemi farklı frekans, dalga boyu ve datuma sahip olduğu için GNSS ile konum belirleme daha da karmaşık ve zorlu bir konu haline gelmiştir.

Mühendislik amaçlı çalışmaların gerektirdiği doğruluklara göreli GNSS teknikleri ile ulaşılırken, bir diğer konum belirleme tekniği olan GNSS ile mutlak konum belirleme doğruluklarında da önemli iyileştirmeler yapılmıştır. Tek frekanslı alıcılara yalnızca kod ölçülerinin kullanıldığı tek nokta konum belirleme (SPP: Single Point Positioning) tekniği ve çift frekanslı alıcılara hem kod hem de faz ölçülerinin birlikte kullanıldığı hassas nokta konum belirleme (PPP: Precise Point Positioning) tekniği, mutlak konum belirleme yönteminin iki farklı uygulamasıdır ve tek nokta konum belirleme tekniği ile üç boyutlu konum belirleme bu makalenin temelini oluşturmaktadır. Bu nedenle, söz konusu iki teknikle ilgili bilgiler GNSS ile konum belirleme yöntemleri adlı başlık altında verilmiştir.

Bu makale ile, Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümünde gerçekleştirilen yüksek lisans tez çalışması ile oluşturulmuş olan yerli ve millî bir "GNSS Tek Nokta Konum Belirleme (KTUN_SPP)" yazılımının ilk aşaması hakkında bilgi verilmesi amaçlanmıştır. Söz konusu yazılım uzun süreli GNSS kod gözlemlerinin ölçü sonrası büro hesabı (post-process) tekniği ile çalışmakta olup, MATLAB (R2020a) programlama dilinde (Mathworks, 2022)

hazırlanmıştır. Yazılım, GPS ve Galileo uydularına ait L1 ve E1 frekans bantlarındaki C1 kod gözlemlerini kullanarak üç boyutlu alıcı anteni koordinatlarının hesaplanması esasına dayanmaktadır (Ayso, 2021). KTUN_SPP yazılımı algoritmasına, belirli atmosferik modeller, yayın ve hassas yörünge verileri de entegre edilerek SPP tekniği ile elde edilebilecek doğruluğunun ne kadar daha iyileşebileceğinin araştırması yapılmıştır. Ayrıca, MATLAB (App Designer) platformunda kullanıcı dostu bir ara yüz tasarlanarak, kullanıcının istediği uydu sistemini (GPS, Galileo, GPS+Galileo) ve dilediği yörünge bilgisini (yayın efemeris, hassas efemeris) seçerek tekli hesap ya da çoklu hesap yöntemleri ile hesaplamalarını yapabileceği olanağı da bulunmaktadır. Kullanıcılar yapılan hesapların çıktılarını ise özet çıktı ya da ayrıntı çıktı olarak (.txt) formatında alabilmektedir. Ayrıca ek paneller olan zaman hesapları ve jeodezik hesaplamaları da kullanabilmektedir.

Bu çalışmada GPS, Galileo ve GPS+Galileo SPP senaryolarında yörünge bilgisi olarak yayın efemerisi ile olan sonuçları incelenmiştir. Yukarıda da ifade edildiği gibi KTUN_SPP, yörünge bilgisi olarak hassas (IGS) efemeris verileri ile de hesaplamalar yapabilmektedir. Ancak SPP tekniğinin doğası gereği yayın efemerisleri ile kullanımı daha anlamlı olup, konu bütünlüğünü bozmaması adına bu çalışmada hassas efemeris senaryosuna yer verilmemiştir.

UYDULARLA KONUM BELİRLEME SİSTEMLERİ (GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS)

Global Konum Belirleme Sistemi (GPS: Global Positioning System)

GPS, herhangi bir yer ve zamanda, her türlü hava koşulunda, yüksek doğrulukta, ortak bir koordinat sisteminde ve ekonomik olarak üç boyutlu konum, hız ve zaman belirlenmesine olanak veren uydu tabanlı bir radyo navigasyon sistemidir (Seeber, 2003; Kahveci ve Yıldız, 2022). GPS uyduları, yeryüzünden yaklaşık 20200 km yükseklikte, ekvatora göre 55 derecelik eğim ile 6 tane orta uzaklıklı dünya yörüngesine (MEO: Medium Earth Orbit) yerleştirilmişlerdir. Her GPS uydusunun dünyayı tam bir dolanım süresi 11 saat 58 dk olup, yeryüzündeki bir gözlemci bulunduğu enlemde aynı uyduya bir gün içerisinde iki kez gez gözlem yapabileceği olanağına sahiptir. 12 Nisan 2022 itibarıyla 30 adet GPS uydusu aktif olarak hizmet vermeye devam etmektedir (GPS, 2022).

GPS ile iki temel büyüklük gözlenmekte olup, bunlar kod ve taşıyıcı faz gözlemleridir. Düşük doğruluk isteyen (~ 1-10 metre) ve navigasyon amaçlı gerçek zamanlı uygulamalarda kod ölçüleri tercih edilirken, çok daha yüksek doğruluk isteyen uygulamalarda ve bilimsel amaçlı çalışmalarda ise faz ölçüleri tercih edilmektedir. Diğer taraftan uydulara ait yörünge ve saat bilgileri de doğru ve hassas bir konum belirleme için oldukça önemlidir. Başka bir deyişle, uydu koordinatlarının veya uydu saatlerinin hesaplanmasında yapılacak herhangi bir hata yeryüzündeki noktanın konum doğruluğunu önemli derecede etkileyecektir. Bu bağlamda, gerçek zamanlı konum belirleme uygulamalarında yörünge parametreleri ve saatlerle ilgili veriler navigasyon mesajı aracılığıyla yayın (Broadcast) efemerisi olarak yayınlanırken, GPS verilerinin ölçü sonrası değerlendirilmesi (post-process) işleminde ise çoğunlukla IGS hassas yörünge ve saat bilgileri kullanılmaktadır (Kahveci ve Yıldız, 2022).

Galileo Uydu Sistemi (Galileo Satellite System)

Galileo; Kamu-Özel sektör (Avrupa Komisyonu, Avrupa Uzay Ajansı ve Avrupalı özel şirketler) iş birliği ile gerçekleştirilmiş bir Avrupa uydu navigasyon sistemi olup diğer uydu sistemleri ile birlikte çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır (Seeber, 2003; Xu ve Xu, 2016). Galileo uyduları, yeryüzünden yaklaşık 23200 km uzaklıkta, orta yükseklikli (MEO) üç ekliptik yörünge düzleminde ve ekvatorla 56 derecelik bir eğim yapacak şekilde konumlandırılmışlardır. Nisan 2022 itibarıyla 22 adet Galileo uydusu aktif olarak hizmet vermeye devam etmektedir (Galileo, 2022). Galileo navigasyon sinyalleri, Galileo sinyallerinin iletimi için geniş bir bant aralığı sağlayan E1, E6, E5 (E5a ve E5b) bantları olmak üzere dört frekans bandından yayınlanmaktadır (Galileo OS SIS ICD, 2021).

Galileo uyduları ile sunulan hizmetler Sınırsız Hizmet (OS: Open Service) ve Şifrelenebilir Yüksek Doğruluklu Kullanım Hizmeti (HAS: High Accuracy Service) olarak belirtilmektedir. Ayrıca, Kamu

Kullanımı Hizmeti (PRS: Public Regulated Service) ve Arama-Kurtarma Hizmeti (SAR: Search and Rescue Service) 'de sunulan hizmetler arasındadır. Galileo sistemi mesaj türleri ve servislere ilişkin ayrıntılı bilgiler (Galileo OS-SIS-ICD, 2021)'de verilmektedir.

GNSS HATA KAYNAKLARI (GNSS ERROR SOURCES)

Günümüzde her sistemde olduğu gibi GNSS gözlem ve sinyallerini de etkileyen hata kaynakları söz konusudur. Bu hata kaynakları; uydu yörünge bilgisi hatası, atmosferik etkiler, sinyal yansıma etkisi, alıcı anteni faz merkezi hatası, taşıyıcı dalga faz belirsizliği (ambiguity), faz kesiklikleri (cycle-slips), vb. olarak sayılabilir. Bu hata kaynaklarından tek nokta konum belirlemede çok önemli olan atmosferik hata kaynakları troposferik ve iyonosferik etkilerdir.

GNSS uyduları, yeryüzünde ya da diğer uydularda bulunan alıcılara elektromanyetik dalgalar (sinüs dalgaları) halinde sinyaller göndermektedir. Bu elektromanyetik dalgalar iyonosfer ve troposferden geçerek sinyallerin gecikmesine ve kırılmasına neden olmaktadır (Hobiger ve Jakowski, 2017).

İyonosfer, Dünya atmosferinin yaklaşık 70 ile 1000 km arasındaki üst kısmını oluşturmaktadır. Bu katmanda sinyaller serbest yüklü parçacıklardan etkilenmektedir. İyonosfer, dağıtıcı bir ortam görevi gördüğü için iyonosferik gecikme frekansa bağımlıdır. Bu etki, tek frekanslı alıcılarda belirli iyonosferik düzeltme modelleri (Klobuchar, NeQuick) kullanılarak %50 oranında (en doğru modelde bile %80'e kadar) giderilebilirken (Karaim ve diğ., 2018), çift frekanslı alıcılarda iyonosfer bağımsız kombinasyonlar kullanılarak etkinin %99,99'u giderilebilmektedir (Klobuchar, 1987; Nava ve diğ., 2008; Kahveci ve diğ., 2021).

Troposfer, yeryüzünden yaklaşık 40 km'ye kadar ulaşan Dünya atmosferinin alt kısmını oluşturmaktadır. Bu katmanda sinyal yayılımı su buharı içeriğine ve sıcaklığa bağlıdır. Troposfer dağıtıcı bir ortam görevi görmediği için troposferik gecikme frekans bağımlı değildir. Bu etki bilimsel ve ticari yazılımlarda kullanılan belirli troposferik düzeltme modelleri (Saastamoinen, Hopfield, Niell, VMF ve GMF) ile giderilebilmektedir (Hopfield, 1969; Saastamonien, 1972; Niell, 1996; Kırtıl, 2022).

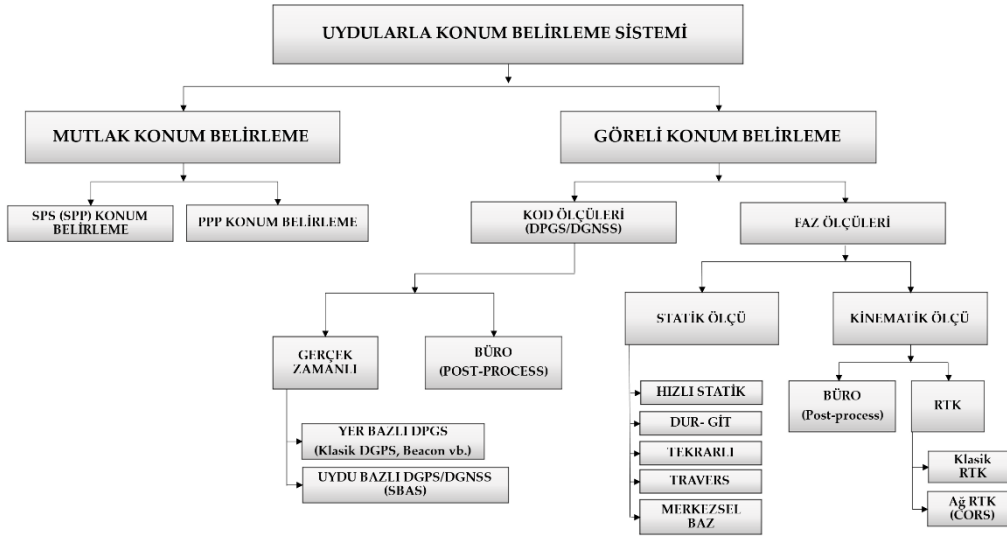
GNSS İLE KONUM BELİRLEME YÖNTEMLERİ (GNSS POSITIONING TECHNIQUES)

Uydularla konum belirleme yöntemlerini temel olarak iki başlıkta toplamak olanaklıdır. Bu yöntemlerden ilki mutlak konum belirleme diğeri ise görel konum belirleme yöntemidir (Şekil 1).

Mutlak konum belirleme, yeryüzündeki tek bir alıcı ile en az dört uydudan elde edilen uydu alıcı uzaklıkları (kod ve/veya faz) kullanılarak, alıcı anteni koordinatlarının ve alıcı saat hatasının hesaplanması esasına dayanmaktadır (Van Sickle, 2008; Kahveci ve Yıldız, 2022). Bu yöntem kendi içinde Tek Nokta Konum Belirleme (SPP) ve Hassas Nokta Konum Belirleme (PPP) olarak ikiye ayrılmaktadır.

SPP yöntemi ile konum belirlemede tek frekanslı alıcılar ve C/A kod gözlemleri kullanılmaktadır. İyonosferik etki çoklu frekanslı alıcılardaki gibi giderilemediği için elde edilecek olan konum doğrulukları önemli ölçüde düşmektedir. Diğeri bir ifadeyle, günümüzde SPP ile gerçek zamanlı olarak elde edilebilecek doğruluk 1-10 metre arasında olup, yüksek doğruluk isteyen mühendislik amaçlı kullanımlar için uygun değildir. Söz konusu yöntemin kullanıldığı alanlar çok genel olarak araç navigasyon uygulamaları, cep telefonu navigasyon uygulamaları, nokta keşfi vb. olmakla birlikte bu konuda yapılan bilimsel çalışmalar devam etmektedir (Pan ve diğ., 2016; Pan ve diğ., 2021; Guan ve diğ., 2021; Zhang ve Pan, 2022).

PPP yöntemi ise hassas konum belirleme yöntemi olup, bu yöntemde taşıyıcı faz ve kod gözlemleri, hassas yörünge ve saat parametreleri birlikte kullanılmaktadır. Dolayısıyla, PPP ile elde edilen sonuçlar SPP yöntemine göre çok daha yüksek doğruluklu olup, birçok mühendislik amaçlı uygulamada kullanılmaktadır. Ayrıca, PPP'de kullanılacak alıcının çift frekanslı olması sebebiyle oluşturulacak iyonosfer bağımsız kombinasyonlar, büyük bir hata kaynağı olan iyonosferik gecikmeyi büyük oranda ortadan kaldırılmakta ve kullanıcılara cm mertebesinde doğruluklar sağlayabilmektedir (Zumberge ve diğ., 1997)



Şekil 1. Uydularla konum belirleme yöntemleri (Kahveci ve Yıldız, 2022)

Figure 1. Methods of positioning with GNSS (Kahveci and Yıldız, 2022)

Görelî konum belirleme ile mutlak konum belirleme yöntemleri arasındaki en temel fark ise görelî konum belirleme yönteminde koordinatı bilinen bir referans noktasına ihtiyaç duyulmasıdır. Diğer bir ifadeyle bu yöntemde, koordinatı bilinen bir referans noktasına göre koordinatı bilinmeyen noktaların koordinatlarının belirlendiği geleneksel bir konum belirleme yöntemidir (Kahveci ve Yıldız, 2022). Kod ya da faz gözlemlerinin kullanılabilirdiği bu yöntemde hem referans hem de koordinatı aranan noktada eşzamanlı gözlemler yapılması gerekmektedir (Hofmann-Wellenhof ve diğ., 2008).

GPS+Galileo ÖZELLİKLİ TEK NOKTA KONUM BELİRLEME YAZILIMI (KTUN_SPP) (GPS+Galileo ENABLED SINGLE POINT POSITIONING SOFTWARE (KTUN_SPP))

Bu çalışma kapsamında GPS+Galileo özellikli uzun süreli statik kod gözlemleri kullanılarak konum hesabı yapan tek nokta konum belirleme (SPP) yazılımı hazırlanmış olup yazılıma ilişkin özellikler Çizelge 1’de, yazılıma ait algoritma ise Şekil 2’de verilmiştir.

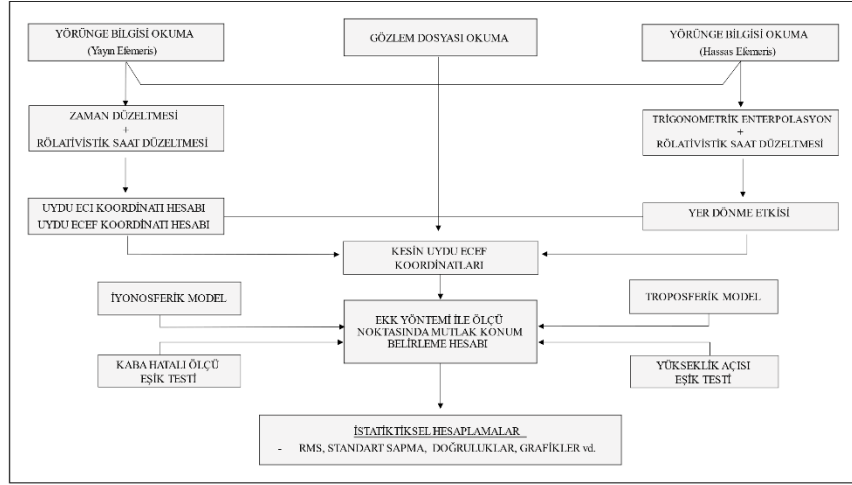
Çizelge 1. Tek nokta konum belirleme yazılımı (KTUN_SPP) özellikleri

Table 1. Single point positioning software (KTUN_SPP) properties

Kullanılan Platform	MATLAB (R2020a)
Desteklenen Uydular	GPS ve Galileo
Frekans Bantları ve Gözlem Türü	L1 ve E1 (C1 Kod Gözlemi)
Ölçüm Yöntemi	Tek frekansta SPP
Atmosferik Düzeltmeler	İyonosfer ve Troposfer
Çözüm Yapılan Yörünge Dosyası	Yayın Efemerisi ve Hassas Efemeris
Kullanıcı Arayüzü	MATLAB (R2020a) App Designer
Dosya Seçimi (Hesaplama için)	Tekli Dosya ve Çoklu Dosya
Çıktı Seçimi	Özet Çıktı ve Ayrıntı Çıktı (.txt)
Ek Hesaplar	Zaman Hesapları-Jeodezik Hesaplamalar

Algoritma kapsamında öncelikle, ilgili istasyona ya da ölçüm noktasına ait RINEX (Receiver Independent Exchange Format) gözlem dosyası ile seçilecek efemeris türüne göre yayın efemerisi ya da IGS hassas efemeris dosyalarının okunması işlemi gerçekleştirilmektedir. Seçilen efemeris türü yayın efemerisi olduğunda, uydu koordinatlarının daha hassas elde edilebilmesi için oldukça önemli olan zaman düzeltmesi ve rölativistik saat düzeltmesi getirilmektedir. Söz konusu düzeltmelerin ardından,

ilgili olan her bir epoktaki her bir uydunun yörünge düzlemindeki koordinatları (ECI: Earth Centered Inertial) ve yer merkezli yer sabit koordinatları (ECEF: Earth Centered Earth Fixed) hesaplanmaktadır. Ardından, hesaplanan koordinatlara yer dönme etkisi de getirilerek kesin uydu ECEF koordinatları elde edilmektedir. Seçilen efemeris türü IGS hassas efemeris olduğunda, koordinatlar ve zamanlar için trigonometrik enterpolasyon işlemi yapılmakta ve yayın efemerisi akışında olduğu gibi koordinatlara rölativistik saat düzeltmesi ve yer dönme etkisi getirilerek kesin uydu ECEF koordinatları elde edilmektedir.



Şekil 2. KTUN_SPP yazılımı algoritması

Figure 2. KTUN_SPP software algorithm

Uydu-alıcı uzaklığının hassas biçimde hesaplanması için gerekli olan iyonosferik ve troposferik modeller, Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Harita Mühendisliği bölümünde başka bir yüksek lisans tezi kapsamında hazırlanmış olup, KTUN_SPP yazılımına entegre edilmiştir (Kahveci ve diğ., 2021; Kırtıl, 2022). Söz konusu modellerden iyonosferik etki hesabı için Klobuchar modeli (Klobuchar, 1987), troposferik etki hesabı için ise Niell troposferik modeli (Niell, 1996) kullanılmıştır. Bu düzeltmelerin ardından elde edilen veriler kaba hatalı ölçü eşik testine, yükseklik açısı eşik testine ve PDOP (Position Dilution of Precision) eşik testine tâbi tutulmaktadır. Test sonucuna göre uyumlu olmayan ölçüler ayıklanmakta ve kalan ölçülerle ölçü noktasında En Küçük Kareler (EKK) yöntemiyle dengeleme hesabı yapılmaktadır.

KTUN_SPP yazılımı beş ana pencereden oluşacak şekilde tasarlanmıştır. Bunlar; "ZAMAN HESAPLARI", "KTUN FORMAT", "MUTLAK KONUM BELİRLEME (SPP)", "YARDIMCI HESAPLAR", ve "ÇIKTI İNCELEME" penceresi olarak sıralanabilir. Ancak bu makale kapsamında çalışmanın odak noktası olan "MUTLAK KONUM BELİRLEME (SPP)" penceresi ve bu pencerede yapılan hesaplamaların çıktısının alınacağı "ÇIKTI İNCELEME" penceresi açıklanmıştır. Bu pencerelere ait görüntüler Şekil 3 ve Şekil (4.a. ve 4.b.)'de verilmiştir.

Şekil 3. MUTLAK KONUM BELİRLEME (SPP) penceresi GPS-yayın efemerisi-çoklu dosya (5 adet) ekran görüntüsü

Figure 3. Screenshot of ABSOLUTE POSITIONING (SPP) window GPS-broadcast ephemeris-multi file (5 pcs)

“MUTLAK KONUM BELİRLEME (SPP)” penceresinde uydu sistemi seçimi kısmında GPS, Galileo ya da GPS+Galileo seçenekleri bulunmaktadır. Diğer taraftan efemeris bilgisi seçimi kısmından yayın efemerisi ya da hassas efemeris seçimleri yapılabilmektedir. Gözlem tipi seçimi kısmında, çalışma kapsamında yalnızca C1 kod ölçüleri kullanıldığı için C1 butonu aktif hale getirilmiş, L1+L2 butonunun ise daha sonraki çalışmalarda faz ölçülerinin de dahil edilmesi ile aktif hale getirilmesi planlanmaktadır. Dosya seçimi kısmından tek dosya ya da maksimum 5 adet olacak şekilde çoklu dosya seçimi gerçekleştirilebilmektedir. İstenilen seçimler yapıldıktan sonra ilgili gözlem dosyaları, navigasyon dosyaları, kaba hatalı ölçü eşik değeri ve yükseklik açısı eşik değeri girilerek “HESAPLA” butonu ile hesaplama işlemi yapılmakta “TÜMÜNÜ TEMİZLE” butonu ile de yapılan yükleme işlemleri temizlenebilmektedir.

Sorunsuz bir hesaplama yapılabilmesi için yüklenecek gözlem ve navigasyon dosyaları RINEX standardında, hassas efemeris dosyaları ise (.sp3 ya da .eph) standardında olmalıdır. Diğer taraftan yüklenecek gözlem dosyaları ve yörünge dosyaları birbiri ile uyumlu olmalıdır. Başka bir ifadeyle ölçüm noktasının 4 karakterli nokta adları, yılın günü (day, day of year), oturum numaraları aynı olmalıdır. Aksi halde KTUN_SPP, ilgili hata mesajlarını vererek kullanıcının doğru bir şekilde yükleme yapabilmesi için kullanıcıyı yönlendirecektir. Örnek olarak yüklenebilecek gözlem dosyası, yayın efemerisi ve hassas efemeris dosyaları Çizelge 2’de verilmiştir.

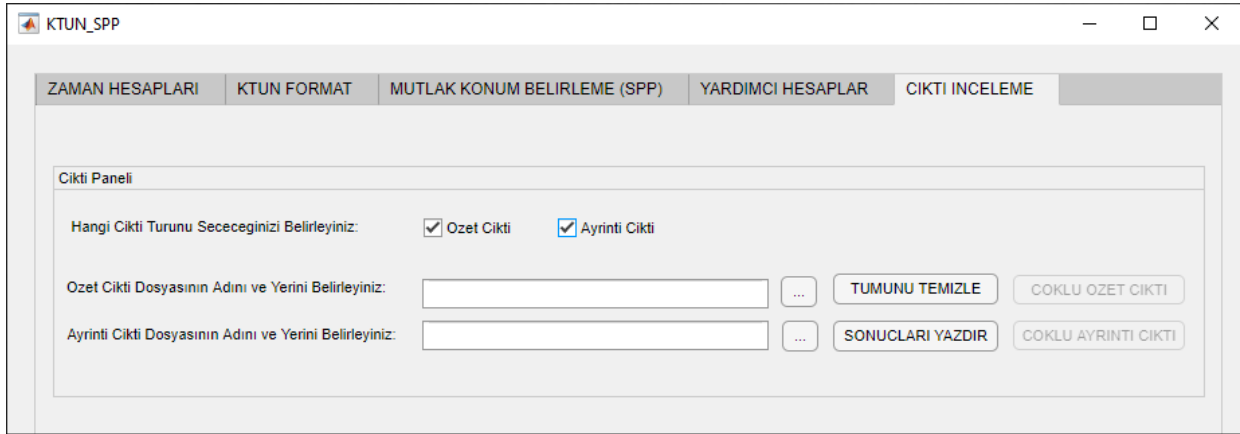
Çizelge 2. KTUN_SPP için yüklenebilecek örnek dosya türleri (23 Nisan 2021 ANKR istasyonu)*Table 2. Sample file types that can be uploaded for KTUN_SPP (April 23, 2021 ANKR station)*

Gözlem Dosyası	Yayın Efemerisi Dosyası	Hassas Efemeris Dosyası
ankr1130.21o	ankr1130.21n	igs21545.sp3
	brdc1130.21n	cod21545.eph
	ankr1130.21l	esa21545.sp3
	ANKR00TUR_R_20211120000_01D_EN.rnx	jpl21545.sp3 vd.

“ÇIKTI İNCELEME” penceresi, daha önce de ifade gibi “MUTLAK KONUM BELİRLEME (SPP)” penceresinde yapılan hesaplamaların sonuç çıktısının (.txt) alınacağı penceredir. Bu pencerede kullanıcıya özet çıktı ve ayrıntı çıktı olmak üzere iki farklı çıktı türü sunulmaktadır. Söz konusu çıktıların içeriği Çizelge 3’de, yazılıma ait ekran görüntüleri ise Şekil (4.a. ve 4.b.)’de verilmektedir.

Çizelge 3. KTUN_SPP “ÇIKTI İNCELEME” penceresi içeriği*Table 3. Contents of the KTUN_SPP “OUTPUT REVIEW” window*

Özet Çıktı Dosyası İçeriği	Ayrıntı Çıktı Dosyası İçeriği
Seçilen Uydu Tipi (GPS, Galileo, GPS+Galileo)	Ayrıntılı çıktı dosyası içeriğinde özet çıktı dosyası içeriğine ek olarak, seçilen uydu tipine göre 24 saatlik ölçüm süresince (2880 epok) hangi uyduların toplam kaç epokta atıldığı ve hangi epoklardan çıkarıldığı sonuçları yer almaktadır (Şekil 4.b.). Örneğin; 2 numaralı GPS uydusu toplam 108 epoktan atılmıştır ve bu uydunun atıldığı epoklar sırasıyla 1, 2, 303, 304, 305, 1527, 1528.... 2860, 2861 şeklinde devam etmektedir. Diğer taraftan 11 numaralı GPS uydusu hiçbir epoktan atılmamıştır. Tüm uydular için ve tüm uydu sistemi seçimleri için bu istatistikler KTUN_SPP (.txt) çıktısında verilmektedir.
Gözlem Dosyası Adı	
Navigasyon Dosyası Adı ya da Yörünge Dosyası Adı	
İyonosferik Düzeltme İçin Yüklenen Navigasyon Dosyası Adı	
Hesaplama Parametreleri	
Datum ve Tarih	
X, Y, Z Kartezyen Koordinatları ve Standart Sapmaları	
Hesaplanan Kartezyen Koordinatlar ve Yaklaşık Koordinatlar Farkı	
Enlem, Boylam, Elipsoidal Yükseklik	
Hesaplanan Coğrafi Koordinatlar ve Yaklaşık Coğrafi Koordinatlar Farkı	
Toplam RMS (Dengeleme Sonrası Karenel Ortalama Hata)	
Referans Uydu Saat Kayıklığı	
Hesaplanan Toplam Epok Sayısı	
Atılan Toplam Epok Sayısı	
Toplam Gözlem Sayısı (GPS, Galileo, GPS+Galileo)	
Toplam Atılan Gözlem Sayısı (GPS, Galileo, GPS+Galileo)	
Atılan Gözlem Oranı	



Şekil 4.a. "ÇIKTI İNCELEME" penceresi ekran görüntüsü

Figure 4.a. Screenshot of "OUTPUT REVIEW" window

```

gps_yayin_tek_ozet - Not Defteri
Dosya Düzen Biçim Görünüm Yardım
1 . RINEX Dosyasının Hesaplanmış Sonuç Koordinatları (Yayın Efemerisi)
-----
Secilen Uydu Türü: Sadece GPS
Gözlem Dosyası Adı: ankr1120.21o
GPS Navigasyon Dosyası Adı: brdc1120.21n

Hesaplama Parametreleri: L1 C1
Datum: WGS84
Tarih(Yıl Ay Gün): 2021 4 22

x= 4121947.482326 metre ± 2.7 metre
y= 2652187.211638 metre ± 2.1 metre
z= 4069023.451620 metre ± 2.9 metre

Hesaplanan Kartezyen Koordinatlar(XH)-Yaklaşık Kartezyen Koordinatlar(XY)=
dX(XH-XY) = 13.222326 metre
dY(XH-XY) = -2.600362 metre
dZ(XH-XY) = -11.459380 metre

Enlem (Derece Dakika Saniye) = 39 53 14.5547
Boylam (Derece Dakika Saniye) = 32 45 30.4908
Elipsoidal Yükseklik = 974.872

Hesaplanan Coğrafi Koordinatlar-Yaklaşık Coğrafi Koordinatlar=
dEnlem = -0.000135 sn
dBoylam = -0.000109 sn
dYükseklik = 0.103671 metre

Toplam RMS (Dengeleme Sonrası Kareysel Ortalama Hata) = ± 2.07 metre
Referans Uydu Saat Kayıklığı = 0.000000062582792 saniye

Hesaplanan Toplam EPOK Sayısı = 2879

Atılan Toplam Epok Sayısı= 1

Toplam GPS Gözlem Sayısı = 26196

Toplam Atılan GPS Gözlem Sayısı = 2403

Atılan Gözlem Oranı = % 9.17
-----
St 1, Stn 1

```

```

gps_yayin_tek_ayrinti - Not Defteri
Dosya Düzen Biçim Görünüm Yardım
1 Numaralı Uydu: Atılan Toplam EPOK= 32
1 Numaralı Uydu: Atılan EPOKLAR= 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 286
2 Numaralı Uydu: Atılan Toplam EPOK= 108
2 Numaralı Uydu: Atılan EPOKLAR= 303 304 305 309 310 311 312 313 314 315
3 Numaralı Uydu: Atılan Toplam EPOK= 29
3 Numaralı Uydu: Atılan EPOKLAR= 206 207 208 209 210 211 212 213
4 Numaralı Uydu: Atılan Toplam EPOK= 43
4 Numaralı Uydu: Atılan EPOKLAR= 342 343 344 345 346 347 348 349 350 351
5 Numaralı Uydu: Atılan Toplam EPOK= 86
5 Numaralı Uydu: Atılan EPOKLAR= 228 229 230 231 232 233 234 235 236 237
6 Numaralı Uydu: Atılan Toplam EPOK= 76
6 Numaralı Uydu: Atılan EPOKLAR= 279 280 281 282 283 284 287 289 290 291
7 Numaralı Uydu: Atılan Toplam EPOK= 53
7 Numaralı Uydu: Atılan EPOKLAR= 657 658 659 660 661 662 663 664 665 666
8 Numaralı Uydu: Atılan Toplam EPOK= 109
8 Numaralı Uydu: Atılan EPOKLAR= 256 257 258 259 260 261 262 263 264 265
9 Numaralı Uydu: Atılan Toplam EPOK= 35
9 Numaralı Uydu: Atılan EPOKLAR= 528 529 530 533 544 545 546 547 548 549
10 Numaralı Uydu: Atılan Toplam EPOK= 59
10 Numaralı Uydu: Atılan EPOKLAR= 2418 2419 2420 2421 2422 2423 2424 2425
11 Numaralı Uydu: Atılan Toplam EPOK= 0
11 Numaralı Uydu: Atılan EPOKLAR= 0
12 Numaralı Uydu: Atılan Toplam EPOK= 32
12 Numaralı Uydu: Atılan EPOKLAR= 1595 1596 1597 1598 1599 1600 1601 1602
13 Numaralı Uydu: Atılan Toplam EPOK= 187
13 Numaralı Uydu: Atılan EPOKLAR= 1026 1027 1028 1029 1030 1031 1032 1033
1910 1911 1912 1913 1914 1916 1917 1918 1919 1920 1921 1922 1924 1925
14 Numaralı Uydu: Atılan Toplam EPOK= 76
14 Numaralı Uydu: Atılan EPOKLAR= 234 235 236 237 238 239 242 243 244
15 Numaralı Uydu: Atılan Toplam EPOK= 90
15 Numaralı Uydu: Atılan EPOKLAR= 1090 1091 1092 1093 1094 1095 1096 1097
16 Numaralı Uydu: Atılan Toplam EPOK= 108
16 Numaralı Uydu: Atılan EPOKLAR= 267 268 269 270 271 272 273 274 275
17 Numaralı Uydu: Atılan Toplam EPOK= 90
17 Numaralı Uydu: Atılan EPOKLAR= 498 499 500 501 502 503 504 505 506
18 Numaralı Uydu: Atılan Toplam EPOK= 53
18 Numaralı Uydu: Atılan EPOKLAR= 2149 2150 2151 2152 2153 2154 2155 2156
19 Numaralı Uydu: Atılan Toplam EPOK= 110
19 Numaralı Uydu: Atılan EPOKLAR= 579 580 581 582 584 585 586 587 588
20 Numaralı Uydu: Atılan Toplam EPOK= 90
20 Numaralı Uydu: Atılan EPOKLAR= 746 747 748 749 750 751 752 753 754
21 Numaralı Uydu: Atılan Toplam EPOK= 20
21 Numaralı Uydu: Atılan EPOKLAR= 2787 2790 2793 2794 2795 2797 2799
22 Numaralı Uydu: Atılan Toplam EPOK= 39
22 Numaralı Uydu: Atılan EPOKLAR= 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99
23 Numaralı Uydu: Atılan Toplam EPOK= 165
23 Numaralı Uydu: Atılan EPOKLAR= 719 720 721 722 723 724 725 726 727
24 Numaralı Uydu: Atılan Toplam EPOK= 0
24 Numaralı Uydu: Atılan EPOKLAR= 0
-----

```

Şekil 4.b. GPS yayın efemerisi özet çıktı ve ayrıntı çıktı dosyasının içeriği (.txt)

Figure 4.b. Contents of GPS broadcast ephemeris summary output and detail output file (.txt)

Daha önce de ifade edildiği gibi KTUN_SPP mevcut durumda GPS ve Galileo uydu sistemlerini desteklemektedir. GPS uydu sisteminin farklı uydu sistemleri ile entegre edilmesi birtakım sorunları da beraberinde getirmektedir. Başka bir ifadeyle farklı GNSS sistemleri farklı zaman ve koordinat sistemlerine sahiptir. Bilindiği üzere GPS, Galileo, GLONASS ve BDS uydu sistemleri sırasıyla "WGS84", "GTRF", "PZ90.11", "CGCS2000" datumlarında yayın yapmaktadır. Bu nedenle farklı sistemlerin birlikte kullanılabilmesi için bu sistemlerin aynı datuma ve aynı zaman ölçeğine dayandırılması oldukça önemlidir. Diğer taraftan, (Montenbruck ve diğ., 2015) yaptığı çalışmada GPS, GLONASS, Galileo ve BDS

koordinat sistemleri arasında sadece santimetre düzeyinde farklılıklar olduğunu göz önüne sermiş ve bu durumun metre düzeyinde doğruluğa sahip SPP yönteminde ihmal edilebileceğini belirtmiştir. Dolayısıyla hesaplanacak uydu koordinatları herhangi bir dönüşüme tâbi tutulmadan doğrudan kullanılabilir.

GPS, Galileo, GLONASS ve BDS uydu sistemlerinde sırasıyla “GPS zamanı”, “Galileo sistem zamanı”, “GLONASS zamanı” ve “BDS zamanı” kullanılmaktadır. Buradan hareketle, farklı zaman ölçeklerine ait GNSS sistemlerinin birlikte kullanılabilmesi için belirlenecek referans zaman sistemine ölçeklendirilmesi gerekmektedir. Ek olarak farklı GNSS sistemlerinden gelen sinyallerin alıcı donanım gecikmesi, tek bir alıcı saat parametresi tarafından absorbe edilemez. Bu nedenle GNSS sistemlerinden gelen farklı alıcı saat parametreleri tahmin edilmelidir. Bunun için alternatif bir yol olarak herhangi bir uydu sistemi referans olarak (örn. GPS) seçilir. Ardından GPS ile diğer uydu sistemleri arasındaki sistemler arası sapma (ISB: inter-system bias) parametreleri tanımlanır. Sonuçta; GPS sistem saatine getirilecek düzeltme (GPS receiver clock offset) ve ISB parametreleri aynı anda bilinmeyen olarak tahmin edilir (Zhang ve Pan, 2022).

KTUN_SPP hesaplamalarında nokta bağımlı olan ve modellenemeyen hatalar (örn. sinyal gürültüsü, sinyal yansıma etkisi vb.) ölçülere düzeltme olarak getirilmemektedir. Bunun sebebi bu hata kaynaklarının noktadan noktaya değişkenlik göstermesi nedeniyle ayrı bir analiz yapılması gerekliliğidir. Diğer taraftan, hesaplamalarda GNSS ölçüleri birim ağırlıklı olarak ele alınmıştır. Bu konuda bugüne kadar genel kabul görmüş ve referans olarak alınabilecek bir çalışma bulunmasa da stokastik model çerçevesinde yapılan bazı uygulamalarda GPS kod gözlemlerinin duyarlılığının yaklaşık 0,3 metre, Galileo kod gözlemlerinin duyarlılığının ise yaklaşık 0,6 metre olarak ele alındığı görülmektedir (Cai ve diğ., 2014, Montenbruck ve diğ., 2015, Pan ve diğ., 2016).

KTUN_SPP’de kullanılan kod gözlemi denklemleri (1 ve 2) eşitliğinde verilmektedir.

$$P^G = \rho_0^G + c * (\Delta t_R^G - \Delta t^G) + I_R^G + T_R^G + c * TGD^G + \varepsilon^G \quad (1)$$

$$P^E = \rho_0^E + c * (\Delta t_R^G + ISB_{sys}^{GE} - \Delta t^E) + I_R^E + T_R^E + c * TGD^E + \varepsilon^E \quad (2)$$

Bu eşitliklerde üst indisler olan (G, E) sırasıyla GPS ve Galileo uydularını, alt indisler ($0, R, sys$) ise sırasıyla yaklaşık koordinatları, alıcıyı ve uydu sistemleri arasındaki zaman sistemi farklılığını temsil etmektedir. $P^{G,E}$ ölçülen uydu-alıcı uzaklığını (metre), $\rho_0^{G,E}$ geometrik uydu-alıcı uzaklığını (metre), c boşluktaki ışık hızını (metre/sn), Δt_R^G alıcı saat zamanı ile GPS zamanı arasındaki saniye biriminde farkı, $\Delta t^{G,E}$ uydu saati zamanı ile GPS zamanı arasındaki saniye birimindeki farkı, ISB_{sys}^{GE} GPS ve Galileo uydu sistemleri arasındaki saniye biriminde zaman sistemi farklılığını (ISB), $I_R^{G,E}$ uydu ve ölçü noktasındaki iyonosferik etkiyi (metre), $T_R^{G,E}$ uydu ve ölçü noktasındaki troposferik etkiyi (metre), $TGD^{G,E}$ toplam/zamanlama grup gecikmesini (sn) ve $\varepsilon^{G,E}$ ölçüm gürültüsünü ve modellenemeyen diğer hataları ifade etmektedir.

Söz konusu eşitliklerde yer alan $\rho_0^{G,E}$, ölçü noktasındaki alıcının yaklaşık koordinatları ve yayın efemerisleri aracılığıyla hesaplanan uydu koordinatlarından elde edilmektedir. Δt^G , yayın efemerisleri içerisinde yayınlanan polinom katsayıları kullanılarak hesaplanıp GPS sistem saatine senkronize edilmektedir. $I_R^{G,E}$, Klobuchar iyonosferik modeli kullanılarak giderilmektedir (Klobuchar, 1987). $T_R^{G,E}$, Niell troposferik modeli kullanılarak giderilmektedir (Niell, 1996). $TGD^{G,E}$ ise yayın efemerisi dosyaları aracılığıyla elde edilebilmektedir. Böylece (1 ve 2) eşitliklerinden geriye alıcı koordinatları, alıcı saat hatası ve GPS-Galileo uyduları arasındaki sistem farklılığı olmak üzere beş bilinmeyen kalmaktadır. Dolayısıyla bu beş bilinmeyen çözülmesi için (1 ve 2)’de verilen kod gözlemi denklemlerinin lineerleştirilmesi gerekmektedir. Söz konusu eşitlikler lineerleştirildiğinde (3) genel eşitliği elde edilmektedir.

$$V = A.X - L \quad (3)$$

Eşitlik (3)’te yer alan V düzeltme vektörünü, A katsayılar matrisini, X bilinmeyenler vektörünü ve L gözlenen-hesaplanan vektörünü ifade etmekte olup bunlar eşitlik (4)’de gösterilmektedir.

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{X^{G1}-X_0}{\rho_0^{G1}} & -\frac{Y^{G1}-Y_0}{\rho_0^{G1}} & -\frac{Z^{G1}-Z_0}{\rho_0^{G1}} & 1 & 0 \\ -\frac{X^{G2}-X_0}{\rho_0^{G2}} & -\frac{Y^{G2}-Y_0}{\rho_0^{G2}} & -\frac{Z^{G2}-Z_0}{\rho_0^{G2}} & 1 & 0 \\ & & \vdots & & \\ -\frac{X^{Gn}-X_0}{\rho_0^{Gn}} & -\frac{Y^{Gn}-Y_0}{\rho_0^{Gn}} & -\frac{Z^{Gn}-Z_0}{\rho_0^{Gn}} & 1 & 0 \\ -\frac{X^{E1}-X_0}{\rho_0^{E1}} & -\frac{Y^{E1}-Y_0}{\rho_0^{E1}} & -\frac{Z^{E1}-Z_0}{\rho_0^{E1}} & 1 & 1 \\ -\frac{X^{E2}-X_0}{\rho_0^{E2}} & -\frac{Y^{E2}-Y_0}{\rho_0^{E2}} & -\frac{Z^{E2}-Z_0}{\rho_0^{E2}} & 1 & 1 \\ & & \vdots & & \\ -\frac{X^{Ek}-X_0}{\rho_0^{Ek}} & -\frac{Y^{Ek}-Y_0}{\rho_0^{Ek}} & -\frac{Z^{Ek}-Z_0}{\rho_0^{Ek}} & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad L = \begin{bmatrix} \rho_R^{G1} - p^{G1} \\ \rho_R^{G2} - p^{G2} \\ \vdots \\ \rho_R^{Gn} - p^{Gn} \\ \rho_R^{E1} - p^{E1} \\ \rho_R^{E2} - p^{E2} \\ \vdots \\ \rho_R^{Ek} - p^{Ek} \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} \Delta_X \\ \Delta_Y \\ \Delta_Z \\ c \cdot \Delta t_R^G \\ c \cdot ISB_{sys}^{GE} \end{bmatrix} \quad (4)$$

↗ katsayılar matrisinde yer alan X^{Gn}, Y^{Gn}, Z^{Gn} ve X^{Ek}, Y^{Ek}, Z^{Ek} ifadeleri (n =GPS uydusu sayısı, k =Galileo uydusu sayısı) olmak üzere GPS-Galileo uydularının ECEF koordinat sistemindeki kartezyen koordinatlarını, X_0, Y_0, Z_0 ifadesi yeryüzündeki alıcının yaklaşık koordinatlarını, ρ_0^{Gn} ve ρ_0^{Ek} GPS-Galileo uyduları ile alıcı arasındaki geometrik uzunluğu ifade etmektedir. L matrisinde yer alan ρ_R^{Gn} ve ρ_R^{Ek} ifadeleri gözlem dosyasından okunan gözlem (pseudorange) değerlerini, p^{Gn} ve p^{Ek} ifadeleri düzeltme getirilmiş uydusu-alıcı uzaklıklarını (1 ve 2) ifade etmektedir. Son olarak X matrisinde yer alan $\Delta_X, \Delta_Y, \Delta_Z$ ifadeleri sırasıyla alıcının yaklaşık koordinatlarına getirilecek düzeltmeyi, $c \cdot \Delta t_R^G$ alıcı saat zamanı ile GPS zamanı arasındaki farkı ve $c \cdot ISB_{sys}^{GE}$ GPS ve Galileo uydusu sistemleri arasındaki zaman sistemi farklılığını ifade etmektedir.

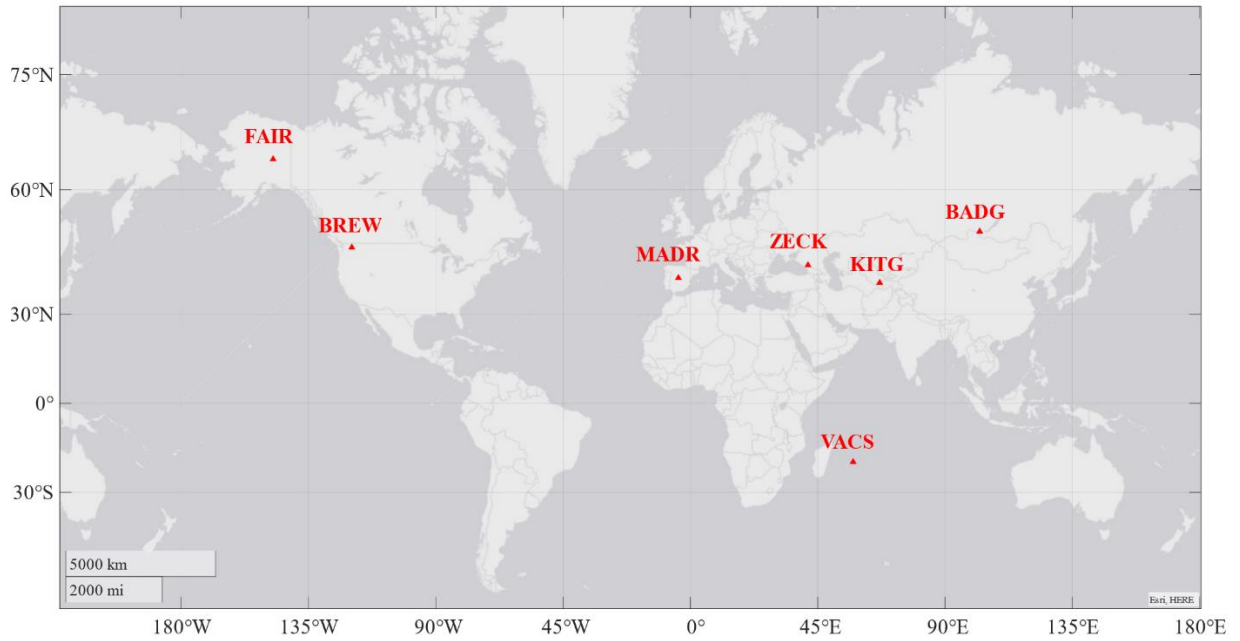
SAYISAL UYGULAMA (COMPUTATIONS)

KTUN_SPP yazılımının performansını test etmek amacıyla çalışma kapsamında 7 adet IGS istasyonuna ait veri setleri kullanılmıştır. Söz konusu istasyonların coğrafi olarak dağılımı Şekil 5'de gösterilmektedir.

Çalışmada; 2022 yılının 31-37'nci günlerinde 30 saniyelik gözlem aralığına sahip 24 saatlik gözlem dosyaları ile yine aynı günlere ait navigasyon dosyaları (yayın efemerisi) kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Söz konusu istasyonların seçilmesinde bir haftalık periyot boyunca istasyonlara ait gerekli tüm RINEX dosyalarının mevcut olmasına özellikle dikkat edilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan parametreler Çizelge 4'de verilmiştir.

Çizelge 4. KTUN_SPP hesaplamalarında kullanılan veri, model ve parametreler*Table 4. Data, models and parameters used in KTUN_SPP computations*

Adı	Kullanılan veri/model/parametre
Gözlemler	Fark alınmamış (undifferenced) kod gözlemleri
Frekans Bantları	GPS L1 ve Galileo E1
Ölçüm Yöntemi	Tek frekansta SPP
Hesap Senaryosu	GPS, Galileo, GPS+Galileo
Uydu yörünge ve saat bilgisi	Yayın efemerisleri
İyonosferik gecikme	Klobuchar (1987)
Troposferik gecikme	Niell (1996)
Kaba hatalı ölçü eşik değeri	30 metre
Yükseklik açısı eşik değeri	10^0
PDOP eşik değeri	4
Gözlem aralığı	30 saniye
ISB	Uygulandı
Dengeleme Yöntemi	En Küçük Kareler (EKK)

**Şekil 5.** Seçilen istasyonların coğrafi dağılımı*Figure 5. Geographical distribution of selected stations*

Diğer taraftan çalışma için seçilen 7 istasyonun hassas koordinatları “CenterPoint RTX Post-Processing” değerlendirme servisi kullanılarak elde edilmiştir (Trimble, 2022).

Bu çalışma kapsamında KTUN_SPP’den elde edilen sonuçlar ile “CenterPoint RTX Post-Processing” değerlendirme servisinden elde edilen sonuçların yerel jeodezik (toposentrik) koordinat sisteminde karşılaştırması yapılmıştır. Bu karşılaştırmalarda kullanılan eşitlikler (5-9)’da verilmektedir. Burada RMS Root Mean Square, $\Delta E, \Delta N, \Delta U$ sırasıyla doğu, kuzey, yukarı bileşenlerini, n ise toplam epok sayısını belirtmektedir.

$$3\text{-D konum hatası (RMS)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta E_i^2 + \Delta N_i^2 + \Delta U_i^2)} \quad (5)$$

$$2\text{-D yatay bileşenler (doğu ve kuzey) hatası (RMS)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta E_i^2 + \Delta N_i^2)} \quad (6)$$

$$\text{Doğu bileşeni hatası (RMS)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta E_i^2} \quad (7)$$

$$\text{Kuzey bileşeni hatası (RMS)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta N_i^2} \quad (8)$$

$$\text{Yukarı bileşeni hatası (RMS)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta U_i^2} \quad (9)$$

KTUN_SPP, GPS ve Galileo uydularını farklı filtreleme testlerine tâbi tutmakta ve bu testlerden geçemeyen uyduları ya da epokları dengeleme hesabına dahil etmemektedir. Başka bir ifadeyle KTUN_SPP; sağlıklı uyduları, deneme aşamasında (bazen aktif bazen pasif durumda) olan Galileo uydularını, 3σ güven aralığının dışında olan uyduları, belirlenen eşik değerine göre kaba hatalı ölçüleri, sinyal yükseklik açısının belirlenen eşik değerinden yüksek olan uyduları ve PDOP değerinin belirlenen bir eşik değerinden yüksek olan epokları kullanmamaktadır. Bu bağlamda istasyonlara ilişkin bir haftalık süre boyunca kullanılan toplam gözlem sayısı ve söz konusu filtreleme teknikleri ile atılan toplam gözlem sayıları Şekiller (6-8)'de verilmektedir.

BULGULAR VE SONUÇLARIN İRDELENMESİ (RESULTS AND DISCUSSION)

Yapılan sayısal uygulamaya ilişkin sonuçların Ortalama (Ort.) Maksimum (Maks.) ve Minimum (Min.) değerleri Çizelgeler (5-10)'de verilmektedir.

Çizelge 5. Doğu, kuzey ve yukarı bileşenlerindeki GPS SPP sonuçları (metre)

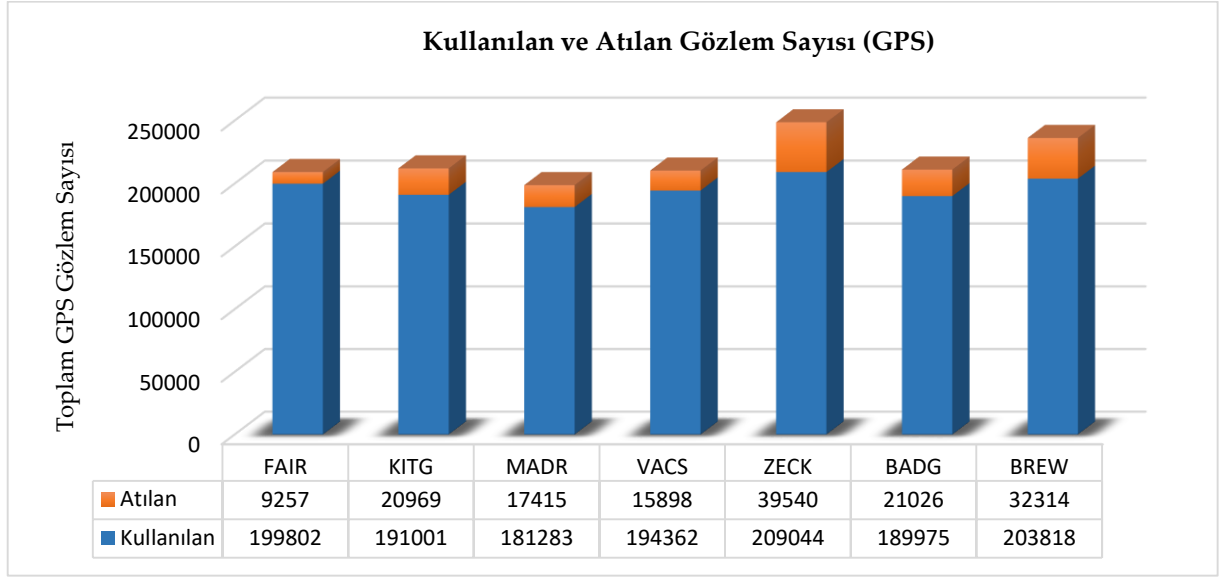
Table 5. GPS SPP results in the east, north and up components (meters)

İstasyon Adları	Ort. Doğu	Maks. Doğu	Min. Doğu	Ort. Kuzey	Maks. Kuzey	Min. Kuzey	Ort. Yukarı	Maks. Yukarı	Min. Yukarı
FAIR	0.78	0.99	0.67	0.93	1.04	0.82	2.82	3.08	2.61
KITG	0.56	0.71	0.42	0.78	0.85	0.68	1.85	2.16	1.61
MADR	0.73	0.84	0.66	1.06	1.25	0.93	2.18	2.61	1.65
VACS	0.79	1.16	0.64	1.93	2.39	1.49	2.26	3.39	1.66
ZECK	0.62	0.80	0.50	0.98	1.09	0.90	2.84	3.39	2.19
BADG	0.51	0.62	0.44	1.04	1.20	0.92	2.79	3.13	2.27
BREW	0.72	0.89	0.57	1.20	1.78	0.81	1.92	2.18	1.73

Çizelge 6. RMS3D ve RMS2D GPS SPP sonuçları (metre)

Table 6. RMS3D and RMS2D GPS SPP results (meters)

İstasyon Adları	Ort. RMS3D	Maks. RMS3D	Min. RMS3D	Ort. RMS2D	Maks. RMS2D	Min. RMS2D
FAIR	3.07	3.40	2.84	1.22	1.44	1.06
KITG	2.09	2.42	1.87	0.96	1.08	0.80
MADR	2.54	2.91	2.14	1.29	1.51	1.14
VACS	3.10	4.24	2.59	2.09	2.55	1.68
ZECK	3.07	3.61	2.45	1.17	1.25	1.09
BADG	3.02	3.35	2.61	1.16	1.30	1.03
BREW	2.39	2.86	2.00	1.40	1.99	0.99



Şekil 6. İstasyon bazında kullanılan ve atılan GPS gözlemi sayısı (7 gün)

Figure 6. Number of GPS observations used and discarded per station (7 days)

Çizelge 7. Doğu, kuzey ve yukarı bileşenlerindeki Galileo SPP sonuçları (metre)

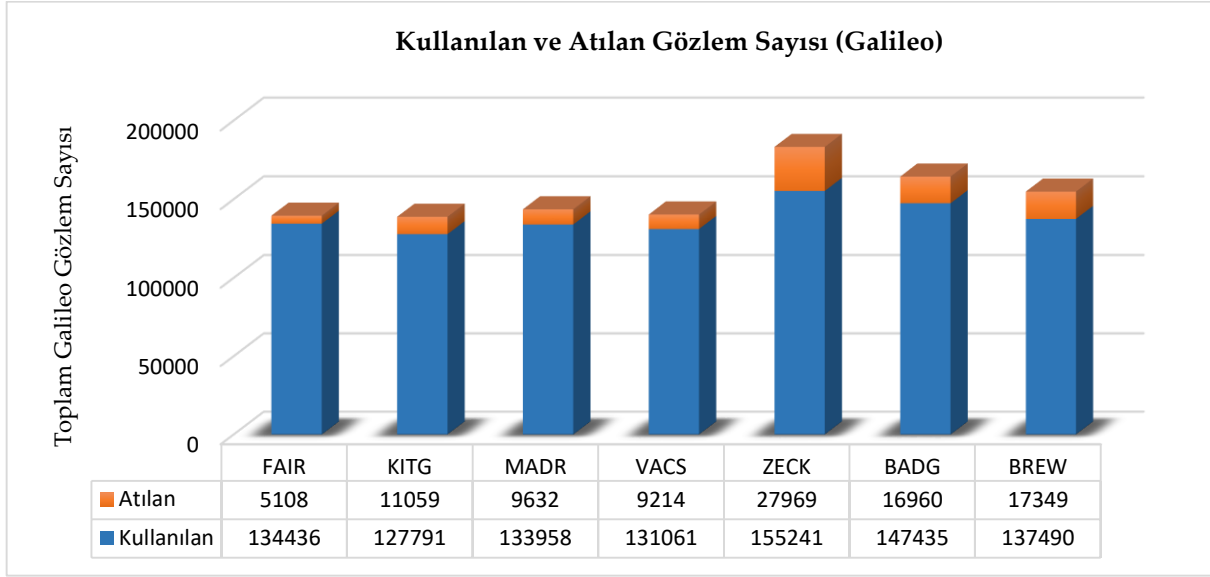
Table 7. Galileo SPP results in the east, north and up components (meters)

İstasyon Adları	Ort. Doğu	Maks. Doğu	Min. Doğu	Ort. Kuzey	Maks. Kuzey	Min. Kuzey	Ort. Yukarı	Maks. Yukarı	Min. Yukarı
FAIR	0.77	0.96	0.63	0.71	0.83	0.65	2.64	3.07	2.50
KITG	0.44	0.67	0.35	0.63	0.74	0.47	1.35	1.62	0.98
MADR	0.61	0.68	0.55	1.02	1.32	0.85	2.08	2.55	1.72
VACS	0.84	1.13	0.54	1.79	2.23	1.36	2.50	3.73	1.47
ZECK	0.42	0.48	0.36	0.85	0.93	0.68	2.68	3.16	2.02
BADG	0.47	0.56	0.42	0.77	0.83	0.68	2.51	2.82	1.93
BREW	0.63	1.17	0.43	1.05	1.56	0.68	1.83	2.01	1.54

Çizelge 8. RMS3D ve RMS2D Galileo SPP sonuçları (metre)

Table 8. RMS3D and RMS2D Galileo SPP results (meters)

İstasyon Adları	Ort. RMS3D	Maks. RMS3D	Min. RMS3D	Ort. RMS2D	Maks. RMS2D	Min. RMS2D
FAIR	2.85	3.29	2.46	1.05	1.20	0.90
KITG	1.56	1.79	1.19	0.77	1.00	0.62
MADR	2.41	2.76	2.20	1.19	1.49	1.02
VACS	3.21	4.48	2.07	1.98	2.48	1.46
ZECK	2.84	3.31	2.26	0.95	1.01	0.81
BADG	2.67	2.97	2.14	0.91	0.97	0.82
BREW	2.23	2.61	1.82	1.24	1.72	0.86



Şekil 7. İstasyon bazında kullanılan ve atılan Galileo gözlemi sayısı (7 gün)

Figure 7. Number of Galileo observations used and discarded per station (7 days)

Çizelge 9. Doğu, kuzey ve yukarı bileşenlerindeki GPS+Galileo SPP sonuçları (metre)

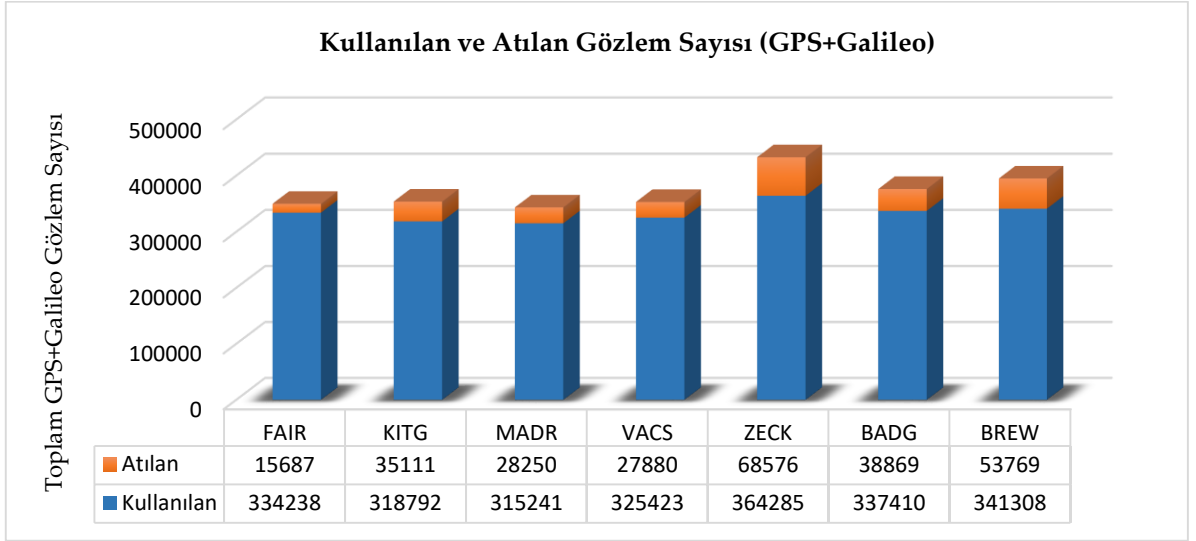
Table 9. GPS+Galileo SPP results in the east, north and up components (meters)

İstasyon Adları	Ort. Doğu	Maks. Doğu	Min. Doğu	Ort. Kuzey	Maks. Kuzey	Min. Kuzey	Ort. Yukarı	Maks. Yukarı	Min. Yukarı
FAIR	0.65	0.86	0.57	0.70	0.76	0.63	2.48	2.68	2.18
KITG	0.46	0.56	0.35	0.64	0.75	0.53	1.54	1.82	1.29
MADR	0.54	0.68	0.46	0.95	1.19	0.83	1.87	2.42	1.30
VACS	0.72	1.04	0.52	1.89	2.28	1.48	2.08	3.27	1.41
ZECK	0.47	0.61	0.37	0.85	0.93	0.71	2.73	3.32	2.05
BADG	0.39	0.51	0.32	0.86	0.99	0.75	2.60	2.94	2.00
BREW	0.57	0.71	0.45	1.05	1.60	0.65	1.65	1.91	1.52

Çizelge 10. RMS3D ve RMS2D GPS+Galileo SPP sonuçları (metre)

Table 10. RMS3D and RMS2D GPS+Galileo SPP results (meters)

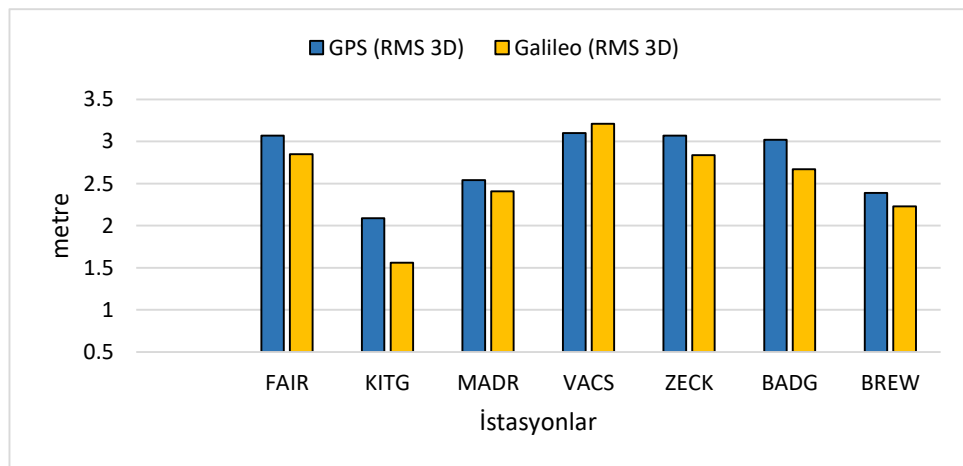
İstasyon Adları	Ort. RMS3D	Maks. RMS3D	Min. RMS3D	Ort. RMS2D	Maks. RMS2D	Min. RMS2D
FAIR	2.66	2.91	2.38	0.95	1.13	0.85
KITG	1.73	2.05	1.52	0.79	0.94	0.64
MADR	2.18	2.63	1.80	1.10	1.37	0.95
VACS	2.94	4.07	2.51	2.03	2.42	1.65
ZECK	2.90	3.48	2.27	0.98	1.05	0.86
BADG	2.77	3.09	2.26	0.95	1.05	0.85
BREW	2.06	2.35	1.72	1.20	1.75	0.81



Şekil 8. İstasyon bazında kullanılan ve atılan GPS+Galileo gözlemi sayısı (7 gün)

Figure 8. Number of GPS+Galileo observations used and discarded per station (7 days)

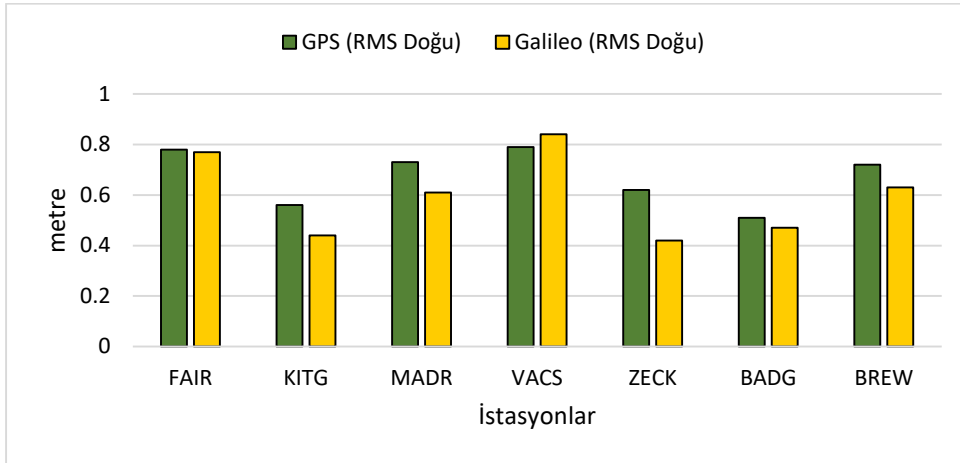
Çizelgeler (5-10) incelendiğinde, başka bir ifadeyle 7 günlük süre boyunca her 24 saatin sonunda elde edilen GPS SPP, Galileo SPP ve GPS+Galileo SPP senaryolarından elde edilen sonuçlar tüm istasyonlar göz önüne alınarak karşılaştırıldığında elde edilen sonuçların sivil (C/A) kod ölçülerinden beklenen doğruluk sınırları (1-10 metre) içerisinde kaldığı görülmektedir. Bilindiği üzere tek frekansta kod ölçüsü kullanarak navigasyon mesajı (yayın efemerisi) ile gerçek zamanlı konum belirlemede elde edilecek doğruluklar 1-10 metre arasında değişmektedir. Ancak KTUN_SPP'nin uzun süreli GNSS kod gözlemlerinin kullanılması, belirli atmosferik düzeltme ve filtreleme tekniklerini de hesaba katmasıyla bu doğrulukları üç boyutlu konum hatası (RMS 3D) cinsinden $\pm 1-3$ metre seviyesine indirmiş başka bir ifadeyle söz konusu doğrulukları iyileştirmiştir. Bu bağlamda GPS SPP ve Galileo SPP senaryolarından elde edilen Ort. RMS 3D doğrulukları Şekil (9)'da verilmiştir. Şekil (9) incelendiğinde, Galileo SPP senaryosundan elde edilen Ort. RMS 3D değerlerinin GPS SPP senaryosundan elde edilen Ort. RMS 3D değerlerinden (VACS istasyonu hariç) daha yüksek doğruluğa sahip olduğu görülmektedir.



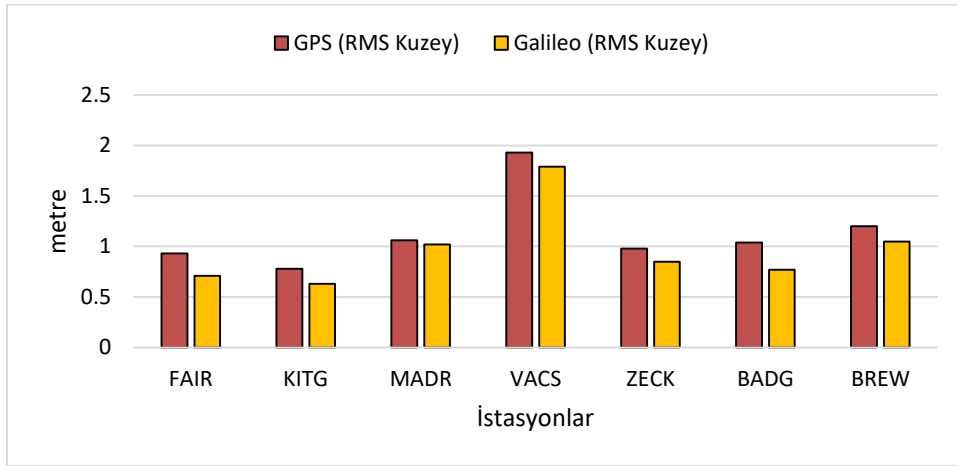
Şekil 9. İstasyonlara ilişkin RMS3D grafikleri (GPS-Galileo)

Figure 9. RMS3D graphics of stations (GPS-Galileo)

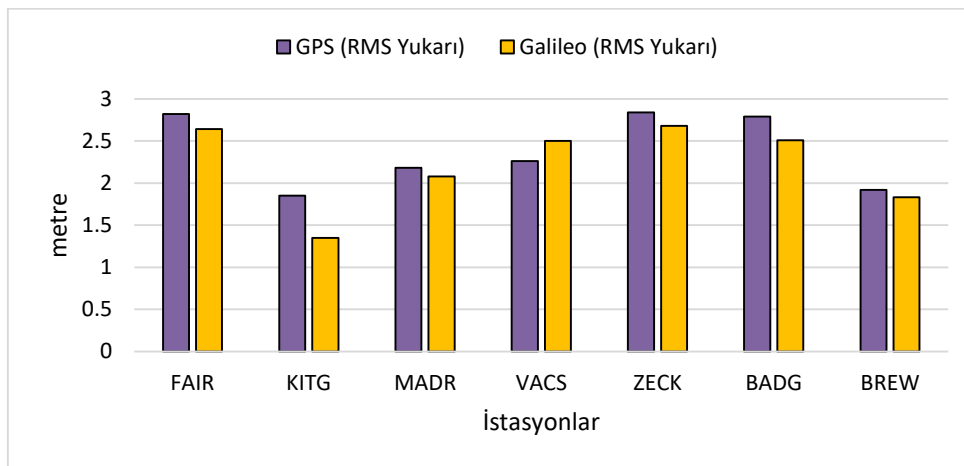
Diğer taraftan Çizelgeler (5-8) göz önüne alındığında Doğu, Kuzey ve Yukarı bileşenlerinin (VACS istasyonu hariç) diğer tüm istasyonlarda Galileo SPP sonuçlarının GPS SPP sonuçlarından daha yüksek doğruluğa sahip olduğu görülmektedir. Söz konusu sonuçlar Şekiller (10-12)'de grafikler şeklinde gösterilebilir.



Şekil 10. İstasyonlara ilişkin RMS Doğu bileşeni grafikleri (GPS-Galileo)
 Figure 10. RMS East component graphics of stations (GPS-Galileo)



Şekil 11. İstasyonlara ilişkin RMS Kuzey bileşeni grafikleri (GPS-Galileo)
 Figure 11. RMS North component graphics of stations (GPS-Galileo)



Şekil 12. İstasyonlara ilişkin RMS Yukarı bileşeni grafikleri (GPS-Galileo)
 Figure 12. RMS Up component graphics of stations (GPS-Galileo)

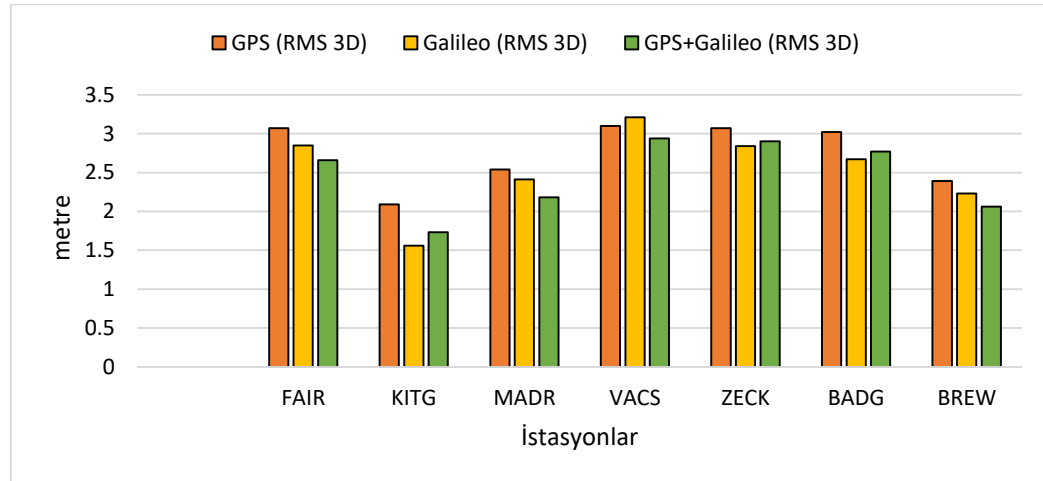
İstasyonlar incelendiğinde tüm bileşenlerde RMS (3D, Doğu, Kuzey ve Yukarı) sadece VACS istasyonunda GPS SPP sonuçlarının Galileo SPP sonuçlarından biraz daha yüksek doğruluğa sahip olduğu görülmektedir. Başka bir ifadeyle VACS istasyonunda, GPS ve Galileo SPP senaryoları RMS

(Doğu, Kuzey ve Yukarı) bileşenleri açısından incelendiğinde aralarındaki farkların sırasıyla (+5 cm, -14 cm ve +24 cm) olduğu görülmektedir. Diğer taraftan VACS istasyonuna ait RTX'in ürettiği rapor dosyası çözümleri incelendiğinde RTX'in bu istasyon için yaptığı hesaplama Galileo uydularını dahil etmediği görülmüştür. RTX rapor dosyasında Galileo uydularının neden elimine edildiğine dair herhangi bir bilgi olmasa da yapılan ayrıntılı inceleme sonucunda bunun nedeni VACS istasyonunda gözlenen Galileo uydu sayısının yetersiz olması, buna bağlı olarak uydu geometrisinin bozulması ve yüksek PDOP değerine sahip olması olarak belirlenmiştir.

Diğer taraftan, KTUN_SPP yazılımının Galileo SPP senaryolarında aynı GPS SPP senaryosunda olduğu gibi Klobuchar iyonosferik modelini kullanması, Galileo SPP'den elde edilen doğruluğu belirli bir seviyede azalttığı düşünülmektedir. Bu konuda yapılmış ve yayınlanmış çalışmalar dikkate alındığında (Oladipo ve Schüler, 2012; Pan ve diğ., 2016), Galileo uyduları için NeQuick iyonosferik düzeltme modelinin kullanılmasının daha uygun olacağı belirtilmektedir.

Yukarıda anlatılan çalışmaya ilave olarak GPS uydularına Galileo uydularının da entegre edilmesiyle GPS+Galileo SPP senaryoları oluşturulmuş ve bununla ilgili sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Çizelgeler (5-10)'a göre GPS, Galileo ve GPS+Galileo SPP senaryoları ort. RMS 3D açısından incelenmiş ve Şekil (13)'deki grafik oluşturulmuştur. Şekil (13)'de GPS SPP ve GPS+Galileo SPP üzerinden bir karşılaştırma yapıldığında GPS+Galileo SPP'nin yalnızca GPS SPP'ye göre daha küçük konum hatasına sahip olduğu görülmektedir. Diğer taraftan ZECK ve BADG istasyonlarında ise Galileo SPP ve GPS+Galileo SPP sonuçlarının birbirine hemen hemen yakın sonuçlar (~6-10 cm) verdiği görülmektedir.



Şekil 13. İstasyonlara ilişkin ortalama RMS3D grafikleri

Figure 13. Average RMS3D graphics for stations

Sonuç olarak; Galileo uydularının da katkısıyla GPS+Galileo SPP sonuçlarının sadece GPS SPP veya Galileo SPP sonuçlarına göre iyileşme gösterdiği açıktır. Ancak bazı istasyonlarda Galileo SPP'nin GPS+Galileo SPP sonuçlarına cm mertebesinde yakın olması metre seviyesinde doğruluğa sahip SPP yönteminde detaylı olarak incelenmesi gereken bir konu olarak görülmemektedir. Diğer taraftan KITG istasyonunda Galileo SPP sonuçları hem GPS SPP hem de GPS+Galileo SPP sonuçlarından daha küçük konum hatasına sahiptir. Bu durumun oluşmasında ölçüm yapılan günlerin yanı sıra Galileo uydularının belirli bir coğrafi bölge ve ölçüm anındaki uydu geometrisine bağlı olması etkili olmuştur. Başka bir ifadeyle, Galileo uydularının mevcut durumu bazı istasyonlarda konum doğruluğunu arttırırken bazı istasyonlarda ise düşürmektedir. Söz konusu durumun oluşmasında Galileo uydularının tam operasyonel kapasiteye (FOC: Full Operation Capability) ulaşmamış olması da etkili olmaktadır.

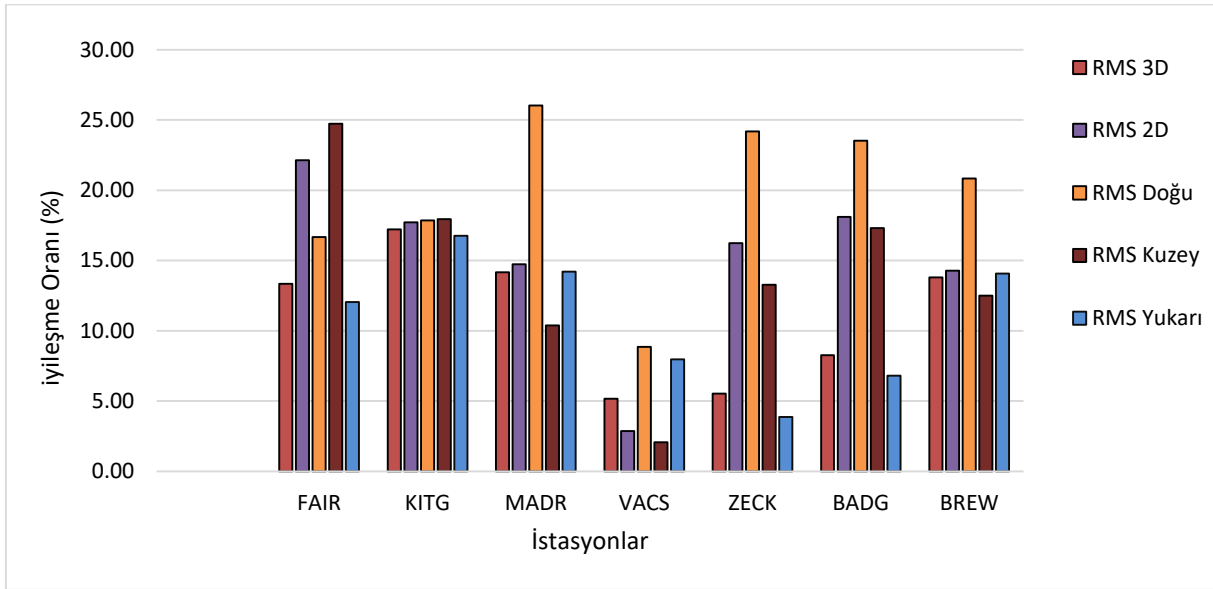
Çizelgeler (5-6 ve 9-10) incelendiğinde; GPS+Galileo SPP sonuçlarının GPS SPP sonuçlarına göre daha düşük konum hatalarına sahip olduğu görülmektedir. Başka bir ifadeyle GPS+Galileo SPP senaryosu ile elde edilen sonuçların sadece GPS SPP senaryosu ile elde edilen sonuçları iyileştirdiği açıktır. Söz konusu

iyileşme oranları (Galileo uydularının sonuçlara katkısı) RMS (3D, 2D, Doğu, Kuzey ve Yukarı) bileşenleri için Çizelge (11) ve Şekil (14)'de verilmektedir.

Çizelge 11. Galileo uydularının RMS (3D, 2D, Doğu, Kuzey ve Yukarı) bileşenlerine katkısı

Table 11. The contribution of the Galileo satellites to the RMS (3D, 2D, East, North and Up) components

İstasyon	RMS 3D (%)	RMS 2D (%)	RMS Doğu (%)	RMS Kuzey (%)	RMS Yukarı (%)
FAIR	13,36	22,13	16,67	24,73	12,06
KITG	17,22	17,71	17,86	17,95	16,76
MADR	14,17	14,73	26,03	10,38	14,22
VACS	5,16	2,87	8,86	2,07	7,96
ZECK	5,54	16,24	24,19	13,27	3,87
BADG	8,28	18,10	23,53	17,31	6,81
BREW	13,81	14,29	20,83	12,50	14,06



Şekil 14. Galileo uydularının RMS (3D, 2D, Doğu, Kuzey ve Yukarı) bileşenlerine katkısı

Figure 14. The contribution of the Galileo satellites to the RMS (3D, 2D, East, North and Up) components

Çizelge (11) ve Şekil (14) incelendiğinde örnek olarak FAIR istasyonunda GPS+Galileo SPP'nin yalnızca GPS SPP'ye göre konumlandırma doğruluğunu RMS (3D, 2D, Doğu, Kuzey ve Yukarı) bileşenlerinde sırasıyla %13,36, %22,13, %16,67, %24,73 ve %12,06 oranında arttırdığı şeklinde yorum yapmak olanaklıdır. Kalan istasyonlarla ilgili yorumlar da benzer şekilde yapılabilir.

Diğer taraftan tüm bileşenler göz önüne alındığında, toplam iyileşmenin en yüksek FAIR istasyonunda olduğu, en düşük iyileşmenin ise VACS istasyonunda olduğu görülmüştür. Ayrıca yine tüm bileşenler göz önüne alındığında en yüksek katkı oranı MADR istasyonu Doğu bileşeninde de olup, düşük katkı oranı VACS istasyonu Kuzey bileşenindedir. Diğer taraftan tüm istasyonlar göz önüne alındığında, Galileo uydularının özellikle Doğu bileşeninde katkısının daha fazla olduğu görülmektedir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

Tek Nokta Konum Belirleme (SPP) yönteminde tek frekanslı alıcılarla yalnızca kod ölçülerinin kullanılması, iyonosferik etkinin %50-60 oranında giderilebilmesi, alıcı antenin çevre koşullarından kolayca etkilenmesi nedenleriyle gerçek zamanlı konum doğruluğu yaklaşık olarak 1-10 metre arasında değişmektedir. Dolayısıyla bu yöntem yüksek doğruluk isteyen mühendislik amaçlı kullanımlar için uygun değildir. Diğer taraftan yeni uydu sistemlerinin ortaya çıkması, GPS modernizasyonundaki

yenilikler, kod ölçü ve yayın efemerislerinin kalitesinin iyileştirilmesi, atmosferik modellerdeki gelişmeler ile birlikte SPP yönteminden elde edilebilecek güncel doğruluklar da iyileşmiştir. Buradan hareketle, SPP yönteminden elde edilebilecek doğruluk, Konya Teknik Üniversitesinde yüksek lisans tez çalışması kapsamında hazırlanan KTUN_SPP isimli tek nokta konum belirleme yazılımı ile test edilmiştir. GPS ve Galileo uydularına ait L1 ve E1 frekanslarındaki C1 kod gözlemlerinin kullanıldığı yazılımda GPS SPP, Galileo SPP ve GPS+Galileo SPP senaryolarına göre hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplamalardan elde edilen sonuçlar, "CenterPoint RTX Post-Processing" değerlendirme servisinden elde edilen sonuçlar ile yerel jeodezik (toposentrik) koordinat sisteminde RMS (3D, 2D, Doğu, Kuzey ve Yukarı) bileşenleri açısından karşılaştırılmıştır.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar incelendiğinde, KTUN_SPP'de uzun süreli GNSS kod gözlemlerinin, belirli atmosferik düzeltme ve filtreleme tekniklerinin kullanılmasıyla üç boyutlu SPP doğruluğu $\pm 1-3$ metre seviyesine inmiş başka bir ifadeyle söz konusu doğruluklar iyileşmiştir. Diğer taraftan doğruluklar RMS (3D, Doğu, Kuzey ve Yukarı) bileşenleri için ayrı ayrı incelendiğinde, Galileo SPP sonuçlarının GPS SPP sonuçlarından daha yüksek doğruluğa sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca tüm bileşenler göz önüne alındığında, GPS+Galileo SPP sonuçlarının sadece GPS SPP veya sadece Galileo SPP sonuçlarına göre çoğu istasyonda daha küçük konum hatalarına sahip olduğu görülmüştür.

Diğer bir karşılaştırma ise GPS+Galileo SPP ve GPS SPP arasında olmuştur. Bu bağlamda GPS+Galileo SPP sonuçlarının sadece GPS SPP sonuçlarına kıyasla iyileşme oranları, başka bir deyişle Galileo uydularının "RMS 3D" açısından sonuçlara katkısı; FAIR, KITG, MADR, VACS, ZECK, BADG ve BREW istasyonlarında sırasıyla yaklaşık %13, %17, %14, %5, %8 ve %14 olarak gözlenmiştir. Diğer bileşenler için iyileşme oranları ise Çizelge (11)'de detaylı olarak verilmiştir.

Ayrıca, KTUN_SPP'nin Galileo SPP senaryosunda Klobuchar iyonosferik düzeltme modelini kullanması Galileo SPP ile elde edilen doğruluğu belirli bir seviyede azalttığı düşünülmektedir. Diğer taraftan, bu konuda yapılan çalışmalar da dikkate alındığında Galileo uyduları için NeQuick iyonosferik düzeltme modelinin kullanılmasının daha uygun olacağı öngörülmektedir. Sonuç olarak çalışma kapsamında hazırlanmış olan KTUN_SPP yazılımının tek nokta konum belirleme uygulamaları için güvenle kullanılabilir bir yazılım olduğu yapılan deneysel testlerle ortaya konmuştur.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar, çalışma kapsamında kullanılan veri setleri için IGS (International GNSS Service)'e, KTUN_SPP'nin oluşturulduğu programlama dili "Mathworks-MATLAB" a ve yazılımın performansının test edildiği online değerlendirme servisi "Trimble-CenterPoint RTX Post-Processing" e teşekkür eder.



KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Ayso, E., 2021, GPS L1-C1 ve Galileo E1-C1 Gözlemleri Kullanılarak Üç Boyutlu Konum Belirlenmesi Üzerine Araştırma, Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.
- Cai, C., Gao, Y., Pan, L. and Dai, W., 2014, "An analysis on combined GPS/COMPASS data quality and its effect on single point positioning accuracy under different observing conditions", *Advances in Space Research*, Cilt 54, Sayı 5, ss. 818–29.
- Galileo OS SIS ICD-2021, "Galileo Open Service, Signal in Space Interface Control Document", European Space Agency.
- Galileo, *Galileo System, Service and Status*, <https://www.gsc-europa.eu/system-service-status/constellation-information>, ziyaret tarihi: 28 Nisan 2022.
- GPS, *GPS Space Segment*, <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>, ziyaret tarihi: 28 Nisan 2022.
- Guan Q., Fan C., Chen G., Chen C., 2021, "Performance Evaluation of BDS/GPS Combined Single Point Positioning with Low-cost Single-Frequency Receiver", *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, Cilt 49, Sayı 11, ss. 2847–2861.

- Hobiger, T., and Jakowski, N., 2017, "Atmospheric signal propagation", *Springer handbook of global navigation satellite systems*, Editör: Teunissen, P.J.G., Montenbruck O., Springer, Cham, 165-193.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Wasle, E., 2008, *GNSS—Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*, Springer Science & Business Media, New York.
- Hopfield, H., 1969, "Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data", *Journal of Geophysical research*, Cilt 74, Sayı 18, ss. 4487-4499.
- International GNSS Service (IGS), <https://igs.org/products/>, ziyaret tarihi: 28 Nisan 2022.
- Kahveci, M., 2017, *Kinematik GNSS ve RTK CORS Ağları*, 2.basım, Nobel Yayıncılık, Ankara.
- Kahveci, M., Alioğlu, D., Çetin G., 2021, "Tek Frekanslı GNSS Alıcılarında Kullanılan İyonosferik Etki Düzeltme Modellerinin Karşılaştırılması", *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 9, Sayı 2, ss. 428-441.
- Kahveci, M., Yıldız, F., 2022, *Uydularla Konum Belirleme Sistemleri (GNSS): Teori ve Uygulama*, 11. basım, Nobel Yayıncılık, Ankara.
- Karaim, M., Elsheikh, M., Noureldin, A., Rustamov, R., 2018, "GNSS Error Sources", *Multifunctional Operation and Application of GPS*, Rustamov, R., Hashimov A.M., *IntechOpen*, 69-85.
- Kırtıl, S., 2022, GNSS Konum Belirlemede Troposferik Etki Hesaplama Modelleri Üzerine Araştırma, Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.
- Klobuchar, J.A., 1987, "Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users", *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems*, Cilt AES-23, Sayı 3, ss. 325-331.
- Mathworks, *MATLAB R2020a*, <https://www.mathworks.com/>, ziyaret tarihi: 28 Nisan 2022.
- Montenbruck, O., Steigenberger, P., Hauschild, A., 2015, "Broadcast versus precise ephemerides: a multi-GNSS perspective", *GPS Solutions* Cilt 19, Sayı 2, ss. 321–333.
- Nava, B., Coisson, P., Radicella, S., 2008, "A new version of the NeQuick ionosphere electron density model", *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Cilt 70, Sayı 15, ss. 1856-1862.
- Niell, A.E., 1996, "Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths", *Journal of geophysical research: solid earth*, Cilt 101, Sayı B2, ss. 3227-3246.
- Oladipo, O. A., Schüler, T., 2012, "GNSS single frequency ionospheric range delay corrections: NeQuick data ingestion technique", *Advances in Space Research*, Cilt 50, Sayı 9, ss. 1204–1212.
- Pan, L., Cai, C., Santerre, R., Zhang, X., 2016, "Performance evaluation of single-frequency point positioning with GPS, GLONASS, BeiDou and Galileo" *Survey Review*, Cilt 49, Sayı 354, ss. 197-205.
- Pan, L., Zhang, Z., Yu, W., Dai, W., 2021, "Intersystem Bias in GPS, GLONASS, Galileo, BDS-3, and BDS-2 Integrated SPP: Characteristics and Performance Enhancement as a Priori Constraints" *remote sensing*, Cilt 13, ss. 4650.
- Saastamoinen, J., 1972, "Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging satellites", *The use of artificial satellites for geodesy*, Cilt 15, ss. 247-251.
- Seeber, G., 2003, *Satellite geodesy: foundations, methods, and applications*, Cilt 4, Walter de Gruyter, Berlin-New York.
- Trimble, *CenterPoint RTX Post-Processing*, <https://www.trimblertx.com/UploadForm.aspx>, ziyaret tarihi: 14 Nisan 2022.
- Van Sickle, J., 2008, *GPS for land surveyors*, Third Edition, Crc Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York.
- Zhang, Z., Pan, L., 2022, "Current performance of open position service with almost fully deployed multi-GNSS constellations: GPS, GLONASS, Galileo, BDS-2, and BDS-3", *Advances in Space Research*, Cilt 69, Sayı 5, ss. 1994-2019.
- Zumberge, J., Heflin, M., Jefferson, D., Watkins, M., Webb, F., 1997, "Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks", *Journal of geophysical research: solid earth*, Cilt 102, Sayı B3, ss. 5005-5017.
- Xu, G., Xu, Y., 2016, *GPS Theory, Algorithms and Applications*, Third edition, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.



SDS SURFACTANT EFFECTS ON STABILITY AND THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF Al_2O_3 - WATER BASED NANOFLUIDS

¹Aycan ALTUN , ²Osman Nuri ŞARA , ³Semahat DORUK 

^{1,2} Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Bursa Technical University, Bursa, TURKIYE

³ Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Çankırı Karatekin University, Çankırı, TURKIYE

¹aycan.altun@btu.edu.tr, ²osman.sara@btu.edu.tr, ³sbarlak@karatekin.edu.tr

Geliş/Received: 05.11.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 28.06.2022

ABSTRACT: Nanofluids have been considered as new potential heat transfer fluids, but there are controversial results about the stability and thermophysical properties of nanofluids in literature. In this experimental study, nanofluids at different aluminium oxide (Al_2O_3) volume fractions (0.3–1.1%) and sodium dodecyl sulfate (SDS) surfactant weight fractions (0.2–0.8%) were prepared by utilizing the two-step method. Stability of the obtained nanofluids was determined according to the sedimentation method, zeta potential and average particle size analysis. Density, viscosity and thermal conductivity of the nanofluids were measured experimentally from 298 K to 338 K. According to the results, the nanofluids prepared with 0.2% SDS began to collapse within a few minutes. However, it was observed that the stability of nanofluids prepared with 0.4% SDS, 0.6% SDS, and 0.8% SDS changed with the particle concentration. Besides, relative density values of nanofluids were found to be independent of temperature for each particle concentration. While relative viscosity of nanofluids increased with temperature, the highest relative thermal conductivity values of nanofluids with different weights of SDS were achieved at different temperatures. In general, relative thermal properties tend to increase with an increase in particle concentration. It has been observed that the stability and dispersion of nanofluids have a high effect on thermophysical properties.

Keywords: Nanofluid, Aluminium Oxide, SDS, Stability, Thermophysical Properties

SDS Yüzeý Aktif Maddesinin Al_2O_3 -Su Bazlı Nanoakışkanların Kararlılığı ve Termofiziksel Özellikleri Üzerine Etkileri

ÖZ: Nanoakışkanlar, yeni potansiyel ısı transfer akışkanları olarak kabul görmektedir; ancak literatürde nanoakışkanların kararlılığı ve termofiziksel özellikleri hakkında tartışmalı sonuçlar bulunmaktadır. Bu deneysel çalışmada, farklı hacim oranlarında alüminyum oksit (Al_2O_3) (%0,3–1,1) ve farklı ağırlık oranlarında sodyum dodesil sülfat (SDS) yüzeý aktif madde (%0,2–0,8) içeren nanoakışkanlar, iki adımlı metot kullanılarak hazırlanmıştır. Elde edilen nanoakışkanların kararlılıkları, sedimantasyon yöntemi, zeta potansiyel ve ortalama boyut analizlerine göre belirlenmiştir. Nanoakışkanların yoğunluğu, viskozitesi ve ısı iletkenliği 298 K ile 338 K sıcaklık aralığında deneysel olarak ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre, %0,2 SDS ile hazırlanan nanoakışkanlar birkaç dakika içerisinde çökmeye başlamıştır. Bunun yanı sıra %0,4 SDS, %0,6 SDS ve %0,8 SDS ile hazırlanan nanoakışkanların partikül konsantrasyonu ile kararlılıklarının değiştiği gözlemlenmiştir. Nanoakışkanların temel akışkana göre bağıl yoğunluk değerlerinin her bir partikül konsantrasyonu için sıcaklıktan bağımsız olduğu bulunmuştur. Nanoakışkanların bağıl viskozitesi sıcaklıkla artarken, farklı SDS ağırlıkları ile hazırlanan nanoakışkanların en yüksek bağıl ısı iletkenlik değerlerine farklı sıcaklıklarda ulaşılmıştır. Genel olarak, bağıl termal özellikler, partikül konsantrasyonundaki artışla artış eğilimi göstermektedir.

Nanoakışkanların kararlılığı ve dispersiyonunun termofiziksel özellikler üzerinde yüksek bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Nanoakışkan, Alüminyum Oksit, SDS, Kararlılık, Termofiziksel Özellikler

1. INTRODUCTION

The advancement of nanofluids, which are prepared with nanoparticles and a base fluid, has become a significant topic in nanotechnology, microelectronic technology, and processes requiring high heat flux. Nanofluids present better thermophysical properties than conventional fluids, not including particles (Sezer et al., 2019). However, not providing the stability of nanofluids is a critical problem that prevents the development of this field. Having high surface areas and energies, nanoparticles tend to form clusters. Due to the forming of particle clusters, volume ratio, hydrodynamic properties, density, viscosity, and thermal conductivity of fluids can be changed (Ali and Salam, 2020). To obtain long term stable nanofluids, chemical and physical treatments are applied to suspensions. High energy applications to disperse agglomerated particles such as ultrasonication, homogenization and ball milling are among the physical processes, while pH change, surface modification of nanoparticles and addition of surfactants are identified as the chemical processes (Sezer et al., 2019). Surfactants are formed of hydrophilic and lipophilic parts, and according to their hydrophilic parts, they are separated into four groups: amphoteric surfactants, cationic surfactants, nonionic surfactants, and anionic surfactants. In solution, surfactants form self-forming molecules that belong to micelles and help decrease the surface tension between the two phases (Ali and Salam, 2020). Micellization is significant for colloid chemistry. Surfactants have been widely used for the preparing stage of nanofluids. Increased interparticle repulsive (electrostatic and steric) forces will improve particle dispersion stability in fluids. With the addition of nanoparticles, strong bonds are formed between the surfaces of nanoparticles and polar groups of surfactants, and the effects of electrostatic repulsion and steric barriers inhibit aggregation of particles (Nair et al., 2018). When an adequate quantity of surfactants is added, a surface film surrounding nanoparticles forms as a consequence of surface adsorption. If the thickness and intensity of the surface film are sufficient, the aggregation of nanoparticles can be prevented (Zareei et al., 2019).

There are many studies about nanofluids prepared by using surfactants in the literature, and one of the most commonly used surfactants at the preparing stage of nanofluids is sodium dodecyl sulfate (SDS) surfactant (Sezer et al., 2019). Sing et al. prepared carbon nanotube (CNT) nanofluid with SDS surfactant, and investigated the stability of nanofluids by changing the surfactant/CNT concentration ratio from 1 to 3. They concluded that nanofluids with SDS surfactant were stable for long-duration, and the best dispersion was obtained when the surfactant/CNT ratio was 1 (Singh et al., 2020). Hwang et al. studied the dispersion stability of nanofluids. The nanofluids were obtained using carbon black (CB) and Ag, water, and SDS and oleic acid as nanoparticles, base fluid and surfactants, respectively. According to the results, adding SDS to CB nanofluids enhanced stability due to strong electrostatic repulsion (Hwang et al., 2008). Rao and Babu reported that the suspensions, including SDS and Al₂O₃ particles, were stable for a long time without settling (Rao and Babu, 2019). Even though the results of these studies are compatible with each other, Das et al. and Ma et al. noted controversial results with these papers. Al₂O₃-water nanofluid was prepared using different surfactants, cetyl trimethyl ammonium bromide (CTAB), sodium dodecylbenzenesulfonate (SDBS) and SDS by Das et al. Stability of obtained nanofluids was determined. They reported that Al₂O₃-water nanofluid with SDS did not show satisfactory stabilization (Das et al., 2017). Ma et al. investigated the effect of SDS on stability of Al₂O₃-CuO/Water and Al₂O₃-TiO₂/Water nanofluids by applying UV-Vis, TEM, and sedimentation methods. Results show that agglomeration and particle clusters occurred by adding SDS (Ma et al., 2021).

Surfactants affect not only the stability but also the thermophysical properties of nanofluids. Xia et al. investigated the thermal conductivity ratio of nanofluids with SDS and polyvinylpyrrolidone (PVP) individually. They observed that with the addition of surfactants, the thermal conductivity ratio of nanofluids first increased and then decreased (Xia et al., 2014). Jha et al. used SDS and Tween 20

surfactants for preparing water-alumina nanofluids and measured thermal conductivity and viscosity values of the obtained nanofluids. According to the results, the values of water alumina with SDS were higher than those of water alumina and water alumina with Tween 20 (Jha et al., 2015). Shah et al. carried out a study on the rheological properties and thermal conductivities of reduced graphene oxide (rGO)/ethylene glycol (EG) nanofluids with SDS. They discovered that when SDS concentration was varied, inconsistent trends for thermal conductivity ratios were observed. Also, the viscosity variation of nanofluids at constant particle concentration was dependent on temperature and SDS concentration. Both enhancement and reduction in viscosity compared to base fluid were observed (Shah et al., 2020). In contrast to these studies, it was reported by Assael et al. that significant variation in thermal conductivity of nanofluids, including carbon-multiwall nanotubes (C-MWNT) with SDS concentration was not obtained (Assael et al., 2004).

As mentioned above, there are conflicting and inconsistent results for nanofluids prepared by using SDS surfactant. Therefore, this study aims to analyze the stability and thermal properties of nanofluids. The density, viscosity, and thermal conductivity measurements of nanofluids prepared at different concentrations of SDS and nanoparticles are conducted in the range of 298 K to 338 K.

2. MATERIAL AND METHOD

2.1. Materials

Al₂O₃ has been preferred for preparing nanofluids because it is cheap and nontoxic. Al₂O₃ nanoparticles were procured from Nanografi Co. Inc. and their properties are given in Table 1. SDS, an anionic surfactant, was utilized as a stabilizer and it was purchased from Merck. Any further purification was not applied to the chemicals.

Table 1. Properties of used chemicals.

	Properties	Values
Al ₂ O ₃ Nanoparticles	Molecular weight (g/mol)	101.96
	Phase	Gamma
	Morphology	Nearly spherical
	Purity (%)	99.5+
	Average particle size (nm)	18
	True density (g/cm ³)	3.9
	Specific heat capacity (J/g.K)	0.89
	Specific surface area (m ² /g)	140
SDS	CAS number	151-21-3
	Molecular weight (g/mol)	288.37
	Density (g/cm ³)	1.01
	Critical micelle concentration CMC (g/dm ³)	2.74

2.2. Preparation of Al₂O₃-Water Nanofluids with Surfactant

The two-step method was applied to prepare nanofluids. Firstly, different weight ratios of surfactants (0.2%, 0.4%, 0.6%, and 0.8%) and water were mixed with a magnetic stirrer at 500 rpm for one hour. A high precision electronic balance (Mettler Toledo) with an accuracy of 0.0001 g was utilised for weight measurements. Then, Al₂O₃ particles at 5 different volume ratios (0.3%, 0.5%, 0.7%, 0.9%, and 1.1%) were added to the solution directly. After mixing at 1000 rpm for 30 min (magnetic stirrer), ultrasonic agitation (NanoLinker NL400) with 300 W was applied to the solution for one hour to increase the dispersion rate.

2.3. Stability Analysis

Sedimentation method, particle size and distribution analysis and zeta potential measurement were utilised to evaluate the stability of the nanofluids. The sedimentation method is easy and economical, and it is based on observing the precipitation of suspensions by taking photographs at regular intervals. Malvern Nano ZS90 was used for particle size and distribution analysis. Zeta potential and particle size analyses were carried out at Çankırı Karatekin University.

2.4. Measurements of Density, Viscosity, and Thermal Conductivity

For density measurements, a calibrated pycnometer with a volume of 25 ml was utilized. Viscosity measurements were carried out by a rheometer (Anton Paar). The thermal conductivity of fluids was determined based on the transient hot-wire method. This method is based on the measurement of the metallic wire's temperature/time response to an immediate electrical signal. The wire is both a thermometer and a heater. The wire is submerged in tested liquid and heated as the current passes through it. The thermal conductivity of the fluid influences the temperature increase of the metallic wire. The device (Thermtest THW-L2) uses Fourier heat conduction equation to calculate the thermal conductivity coefficient (Altun and Şara, 2021). The temperature was adjusted with a sensitivity of 0.1 °C. Before the measurements of the thermal properties of nanofluids, those of pure water were executed. Maximum deviations for water were calculated as 0.3%, 2.1% and 1.2% for density, viscosity and thermal conductivity measurements, respectively.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Nanofluids were prepared as described in the method. Precipitation of nanoparticles was observed for analyzing the stability of nanofluids. The density, viscosity, and thermal conductivity of the nanofluids with 0.2%, 0.4%, 0.6%, and 0.8% by weight of SDS were measured experimentally for 298 K, 308 K, 318 K, 328 K, and 338 K. The SDS weight percent of 0.2 is below the CMC point, which is defined as the surfactant concentration at which micelles begin to form (Singh and Tyagi, 2014). However, the other concentrations are above the CMC value, but it is also reported that temperature has an effect on the CMC point (Mohajeri and Noudeh, 2012). In this study, the base fluid term is referred to as water-surfactant solutions. The thermal properties of base fluids were obtained from our previous study (Altun and Şara, 2021).

3.1 Stability of nanofluids

Figure 1 shows pictures of nanofluids using 0.3% Al₂O₃ and SDS in different concentrations immediately after preparation, 30 minutes after preparation and 24 hours after preparation. According to Figure 1, nanofluids prepared with 0.2 SDS settled in 30 minutes. The highest stability was achieved with nanofluids prepared at a weight percentage of 0.8 SDS.

Pictures of nanofluids with 1.1% Al₂O₃ and SDS in different concentrations immediately after preparation and 4 hours after preparation are given in Figure 2. It has been observed that the higher the particle concentration of the nanofluid, the shorter the precipitation time. When SDS concentration was increased, the stability of nanofluids enhanced. However, nanofluids at the Al₂O₃ particle concentration of 1.1% remained stable for a maximum of 4 hours. After 4 hours, transparent solutions occurred. This behavior is thought to be due to the hydrophile-lipophile balance (HLB) value. The HLB value gives information about the functionality and usage areas of surfactants (Galioğlu Atıcı, 2016). The HLB value of SDS is 40 (Schramm et al., 2003), and a clear solution can be obtained at this HLB value. Ma et al. investigated the stability of Al₂O₃-TiO₂/water nanofluids with SDS by TEM, particle size, and sedimentation analysis. TEM images show that nanofluids with SDS have large agglomerates and clusters. Besides, the average nanoparticle sizes of nanofluids with and without SDS are quite close to each other. It can be seen from sedimentation photographs that the nanofluid with SDS sediment in one day (Ma et

al., 2021). In a study by Shah, the stability of rGO/EG based nanofluids with different SDS concentrations was analyzed. According to the visual inspections of nanofluids, 0.04 vol% nanofluid without SDS surfactant is the most stable, and it was seen that nanofluids sediment 24 hours later (Shah et al., 2020). Zhai et al. investigated the stability of Al₂O₃-EG based nanofluids with SDS. They observed phase separation in nanofluids with SDS after three days, and pure Al₂O₃-EG nanofluid is more stable than the nanofluid with SDS (Zhai et al., 2019).

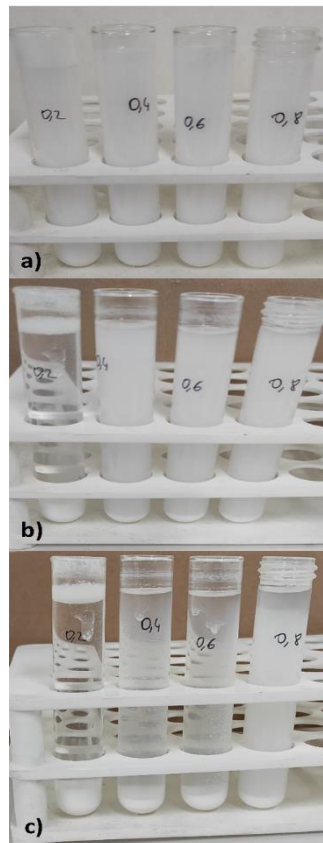


Figure 1. Visual inspection of nanofluids prepared using 0.3% Al₂O₃ and SDS in different concentrations a) immediately after preparation b) 30 min after preparation c) 24 hours after preparation.

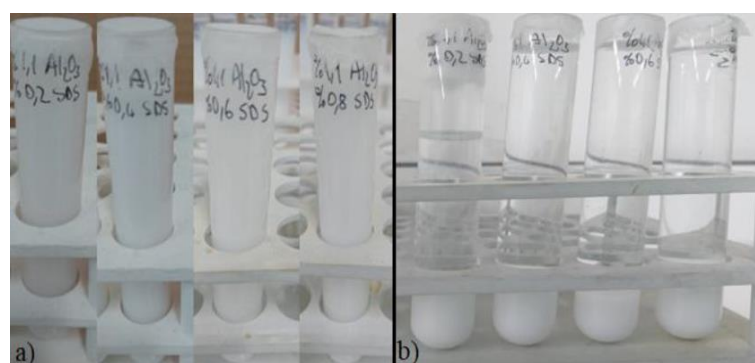


Figure 2. Visual inspection of nanofluids prepared using 1.1% Al₂O₃ and SDS in different concentrations a) immediately after preparation b) 4 hours after preparation.

Zeta potential and average particle size of nanofluids prepared with SDS are given in Table 2. It is known that if the zeta potential is close to ± 30 mV, nanofluids can be reasonably stable, and collapse with little stability when it is around ± 15 mV (Choudhary et al., 2017). Around the isoelectric point, interparticle

repulsive interactions diminish, and when the attractive forces between particles surpass the repulsive forces, unstable highly agglomerated particles occur. If the zeta potential is distant from this point, the attractive force is decreased, and as a result, the average particle size is reduced (Sayan et al., 2009). When the zeta potential values measured 0.30 h after preparation were examined, the minimum and maximum zeta potential values of nanofluids were obtained using 0.2 wt% and 0.8 wt% surfactant ratio, respectively. Obtained nanofluids have little stability but settle lightly according to the zeta potential. Nanofluids with low Al₂O₃ particle concentrations have greater zeta potential values than nanofluids with high Al₂O₃ particle concentrations. These results are also compatible with visual analysis. Because of agglomeration, bigger particle clusters accumulate over time and precipitate, while smaller particles stay suspended in solution. As a result, particle size changes with time (Altun et al., 2021). Zeta potential and average particle size measurements of the nanofluids that settled down were not performed.

Table 2. Zeta potential and average particle size of nanofluids with SDS.

Al ₂ O ₃ volume fraction (%)	SDS weight fraction (%)	Zeta potential (mV)			Average particle size (nm)		
		0.30 h	4 h	48 h	0.30 h	4 h	48 h
0.3	0.0	17.2	-2.4	33.6	355	1887	227
	0.2	-3.5	–	–	1659	–	–
	0.4	-18.0	-37.1	-34.8	429	563	531
	0.8	-27.8	1.9	–	2971	1517	–
1.1	0.0	5.9	–	–	877	–	–
	0.2	-3.6	–	–	825	–	–

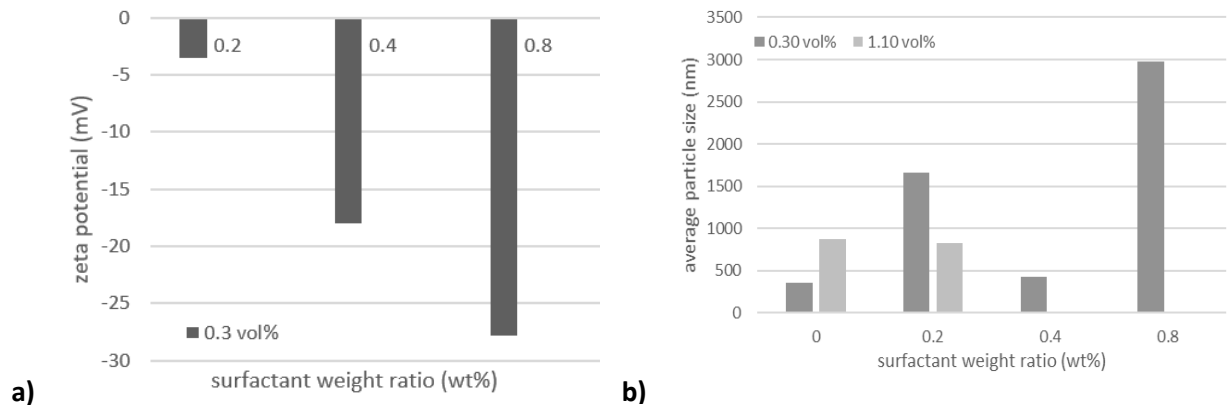


Figure 3. The graphs of a) zeta potential and b) particle size values of nanofluids prepared after 0.30 h versus surfactant concentrations at 298 K.

3.2 Density

The ratio of the nanofluid density to the base fluid density, ρ_r , is referred to as the relative density in this paper. In Figure 4, ρ_r values for nanofluids prepared with different SDS surfactant ratios are plotted against solid particle volume percentages. It is seen that density ratios increase with particle concentration and do not have an important change with temperature for all SDS concentrations. The relative densities of nanofluids prepared with 0.7% Al₂O₃ and different surfactant concentrations at 298 K and 338 K are graphically given in Figure 5. The maximum difference between the relative density values is around 0.17%. Besides, it is observed that relative density tends to increase slightly with surfactant concentration.

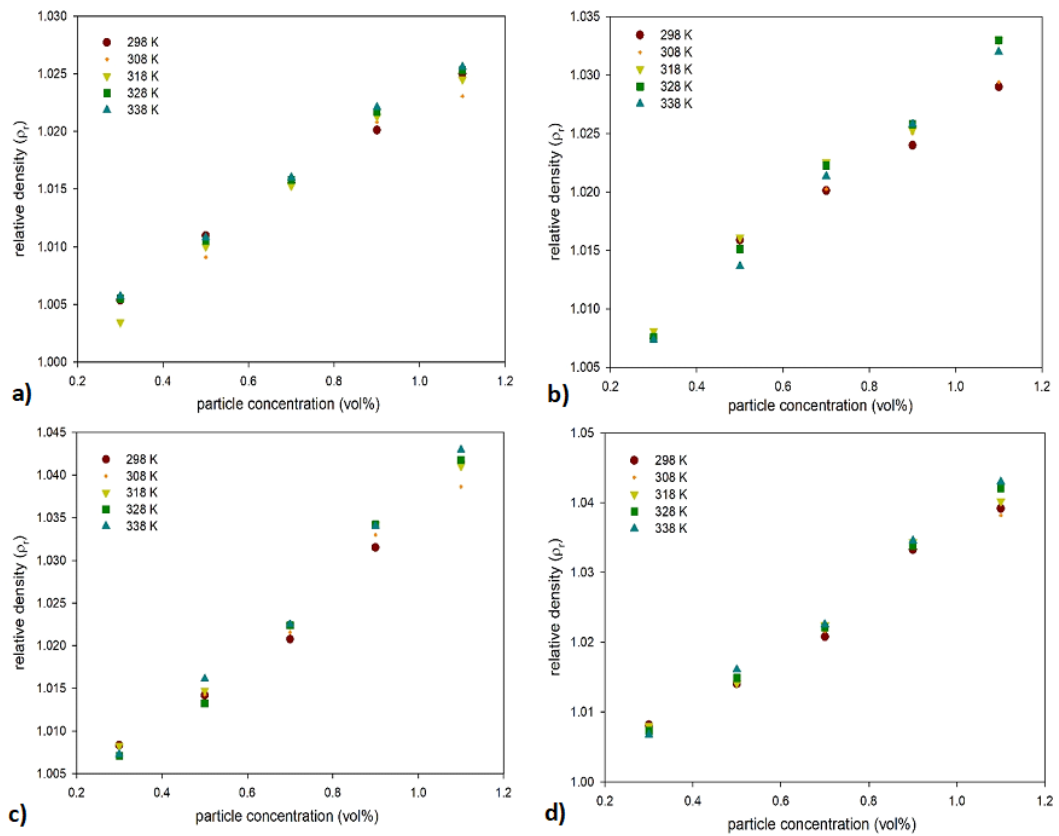


Figure 4. Effects of particle concentration on relative densities of nanofluids at different temperatures a) 0.2% SDS, b) 0.4% SDS c) 0.6% SDS, d) 0.8% SDS.

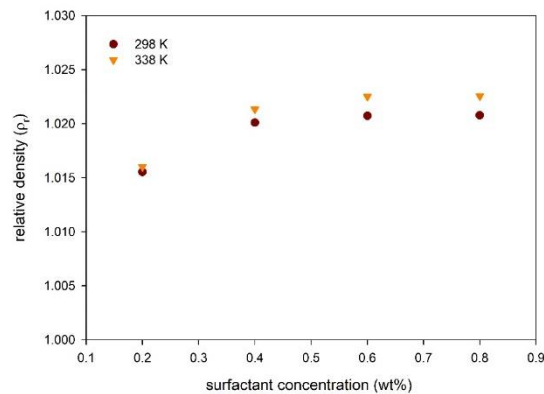


Figure 5. Effects of surfactant concentration on relative densities of nanofluids prepared with 0.7% Al₂O₃ at 298 K and 338 K.

3.3 Viscosity

The ratio of the nanofluid viscosity to the base fluid viscosity, μ_r , is referred to as the relative viscosity in this paper. In Figure 6, the effects of nanoparticle volume percentages on μ_r values of nanofluids prepared with different SDS surfactant ratios are given.

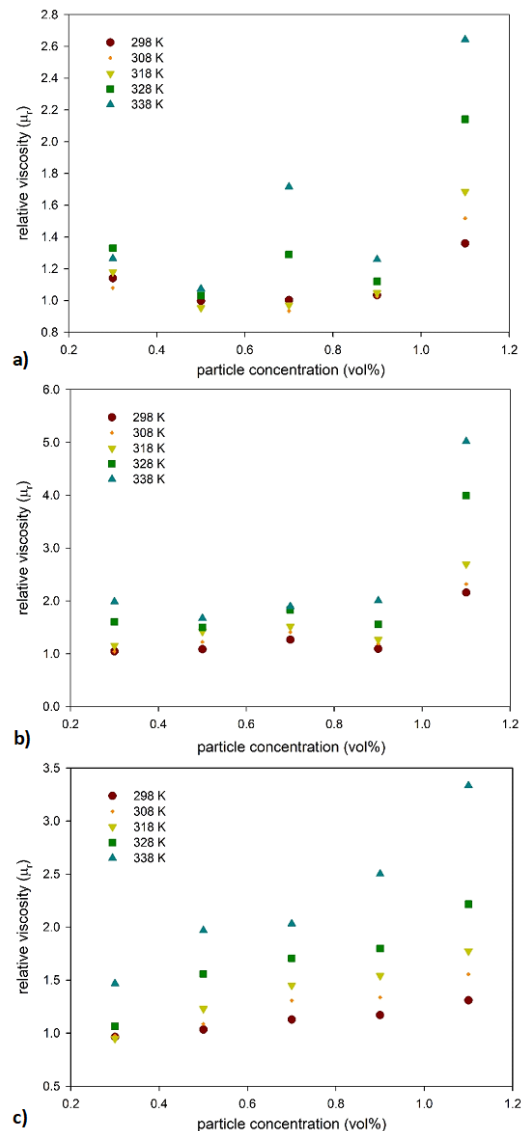


Figure 6. Effects of particle concentration on viscosity of nanofluids at different temperatures a) 0.2% SDS, b) 0.4% SDS, c) 0.8% SDS.

In this section, the effects of surfactant amount, temperature and particle concentration on the relative viscosities of nanofluids have been investigated. It was observed that viscosity values changed nonlinearly with the amount of surfactant. Similar results were found in a study by Khairul et al. Accordingly, it was reported that the viscosity values of the nanofluids depend on the weight fraction of the SDBS surfactant in the suspensions, and the viscosities of the nanofluids change with SDBS irregularly. Zhai et al. analyzed the stability of Al_2O_3 -EG nanofluids prepared with SDS and PVP surfactants. According to the study, it was determined that the nanofluids prepared with SDS are less stable and have a higher viscosity than those with PVP (Zhai et al., 2019).

There are different results regarding the rheological behavior of nanofluids in the literature. The reason for this is that various factors, such as concentration, temperature, surface charge, nanoparticle and base fluid properties, dispersants, aggregation degree and ultrasonication time have an effect on the rheological behavior of nanofluids (Sharma et al., 2016; Wang et al., 2013). It is believed that the aggregation of nanoparticles and Brownian motion are probably mechanisms that affect the rheological properties (Wang et al., 2013). The addition of surfactant affects parameters such as pH, conductivity, zeta potential, suspension stability, and particle aggregation. It has been reported that the relative viscosity is independent of temperature for low particle ratios but is dependent on temperature for higher particle

ratios (Meyer et al., 2012; Meyer et al., 2016). Temperature and particle concentration are significant factors that affect the viscosity of the nanofluid. In this study, the relative viscosity values of nanofluids increased with temperature. Zhai et al. stated that higher relative viscosity was obtained at high temperatures since when the temperature increases, the contribution of the hydrogen bonding network to the viscosity decreases, but the viscous dispersion is dominant (Zhai et al., 2019). Besides, surfactants may not prevent the formation of agglomeration at high temperatures in nanofluids prepared using surfactants. This can cause an increase in viscosity at high temperatures (Suganthi and Rajan, 2017). However, there are controversial results in the literature about the effect of temperature on the viscosity of nanofluids. Many researchers have asserted that the relative viscosity is independent of temperature (Jarahnejad et al., 2015; Longo and Zilio, 2011; Vajjha et al., 2010). On the other hand, there are also studies including that relative viscosity decreases as the temperature increases (Lee et al., 2011; Sundar et al., 2014). In this study, the relative viscosity of nanofluids changes nonlinearly with particle concentration. Although many researchers have claimed that viscosity values increase systematically with particle concentration (Batchelor, 1977; Wang et al., 1999), it was asserted in a study that since the increase in viscosity ratio with the concentration is usually found for nanometric size distributions, it does not follow the classical dependence on the volume fraction (Pastoriza-Gallego et al., 2011).

3.4 Thermal conductivity

The ratio of the thermal conductivity of the nanofluid to the base fluid thermal conductivity, k_r , means the relative thermal conductivity. Figure 7 and Figure 8 show the change of relative thermal conductivity with the particle concentration for different temperatures. In Figure 7a and Figure 7b, the lowest value is obtained at 338 K, while the highest value is obtained at 298 K. However, the relative thermal conductivity values of nanofluids prepared by using weight surfactant concentration of 0.6% SDS and 0.8% SDS change with temperature, independently in Figure 8a and Figure 8b. Besides, to understand the effect of surfactant addition on relative thermal conductivity, the change of relative thermal conductivity values of nanofluids containing different particle concentrations against surfactant concentration at 308 K is shown in Figure 9. According to the figure, relative thermal conductivity values first improve to a certain point and then decrease with an increase in surfactant concentration.

Instead of a single mechanism related to the mechanisms for improving the thermal conductivity of nanofluids, a combination of many effects such as high conductivity paths formation with a higher thermal conductivity as a consequence of the aggregation of particles, the alteration in the thermodynamic properties of the fluid at the solid-fluid interface, the electric charge at the surface, Brownian motion of the particles (Michaelides, 2013), "nano-convection" caused by particle motion (Azizian et al., 2009) are considered. When using different concentrations of surfactant, the rate of thermal conductivity was found to be different for each temperature in a study conducted by Zhai et al. (Zhai et al., 2019). In the literature, it has been stated that with the contribution of Brownian movements and the increase in temperature, molecules and particles become more active and energy transfers from one point to another. Therefore, thermal conductivity values generally increase with temperature linearly or non-linearly. However, there are also studies involving the fact that the relative thermal conductivity decreases as the temperature increases (Kleinstreuer and Feng, 2011; Suganthi and Rajan, 2017). In another study, it was stated that relative thermal conductivity is almost independent of temperature, and the liquid phase is more dominant than the solid phase in the temperature-dependent feature of the nanofluid (Zhang et al., 2006).

The highest relative thermal conductivity value was obtained to be approximately 1.058 at 318 K with nanofluid prepared with the weight surfactant concentration of 0.6% SDS and Al₂O₃ nanoparticle concentration of 0.9%. A similar study was carried out by Xia et al. In this study, the relative thermal conductivities of nanofluids prepared with different particle and surfactant concentrations were investigated. It was reported that the relative thermal conductivity of nanofluid changes depending on surfactant ratio, and optimum values for each particle concentration are achieved with different surfactant

ratios (Xia et al., 2014). It has been suggested by Li et al. that the use of the optimized amount of surfactant to the nanofluid is an important method among the enhancement techniques considered in terms of dispersion behavior and thermal conductivity efficiency (Li et al., 2008). When the amount of surfactant is insufficient, the surfactant cannot completely cover the surfaces of particles, causing the electrostatic repulsion between the particles to be weakened and flocculated. On the other hand, if the amount of surfactant is excessive, supersaturated adsorption occurs and plays a significant role in the formation of flocculations that will weaken the heat transfer between the particles. The narrowing of the heat transfer area because of the high surfactant concentrations may also be a reason for poor thermal conductivity (Wang et al., 2009).

There are controversial results in the literature about the effect of the stability of nanofluids on thermal conductivity. It has been suggested that stability is related to the increase in thermal conductivity of nanofluids. By increasing the distance between particles, the possibility of aggregation decreases, and the dynamism of nanoparticles increases. Thus, the heat transport process is improved (Khairul et al., 2016). On the other hand, Meibodi et al. (Meibodi et al., 2010) claimed that more stable nanofluids do not have higher thermal conductivity values.

As seen in the figures 7 and 8, relative thermal conductivity tends to increase with the particle concentration, but nonlinear change has been observed. In many studies, it has been concluded that the thermal conductivity of nanofluids increases approximately nonlinearly with the nanoparticle weight ratio, the values are close, and the thermal conductivity ratios of nanofluids prepared with higher particle volumes are less than the predicted values. One of the reasons may be that particles in nanofluids with high volume concentrations form agglomerates more quickly than low volume concentrations (Khairul et al., 2016; Wang et al., 2009; Xia et al., 2014; Zhang et al., 2006).

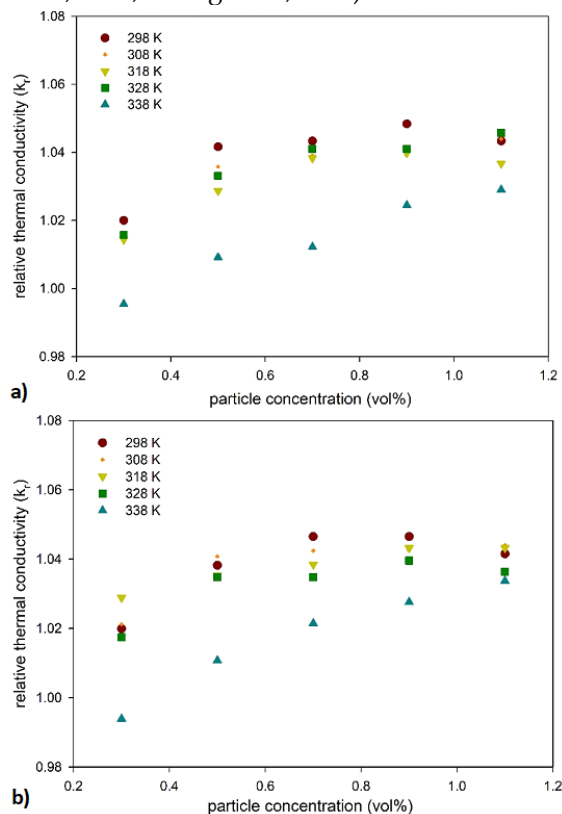


Figure 7. Variation of relative thermal conductivity with nanoparticle amount for nanofluids prepared using SDS a) 0.2% and b) 0.4%.

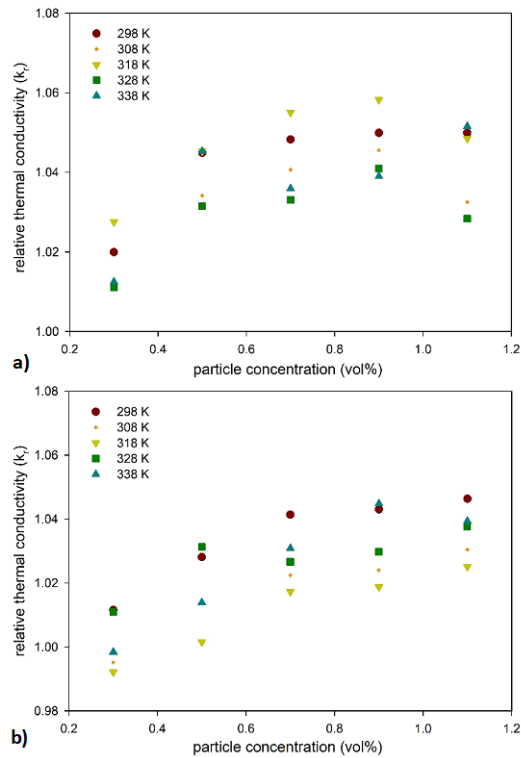


Figure 8. Variation of relative thermal conductivity with nanoparticle amount for nanofluids prepared using SDS a) 0.6% and b) 0.8%.

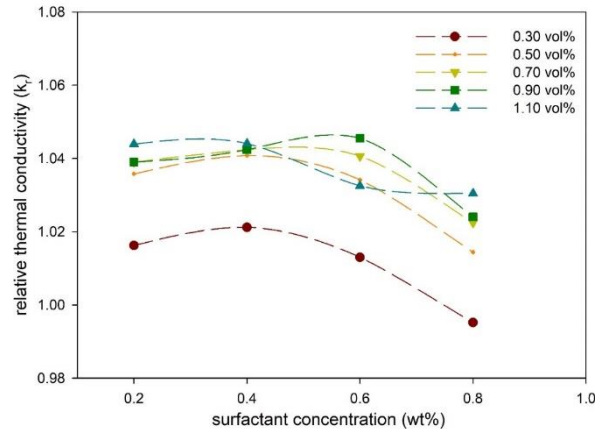


Figure 9. Variation of relative thermal conductivity with surfactant concentration for nanofluids prepared with different particle concentration at 308 K.

4. CONCLUSIONS

Investigations about nanofluids have been continued for nearly three decades. However, there are contradictory results about nanofluids using SDS surfactant as a dispersant agent. In this paper, Al₂O₃-water nanofluids by SDS addition were obtained by using a two-step method. While Al₂O₃ volume fractions were changed from 0.3% to 1.1%, surfactant weight concentration was changed in the range of 0.2% to 0.8%. The sedimentation method, zeta potential and average particle size analyses were used for evaluating the stability of nanofluids. Moreover, the effects of SDS surfactant concentration and temperature on the thermophysical properties of nanofluids were evaluated. According to the results,

nanofluids using SDS surfactants remained stable for a few hours. The relative densities of nanofluids at all studied Al_2O_3 particle concentrations varied with particle concentration but not with temperature. Besides, the relative viscosity values of nanofluids are enhanced as temperature increases. At different temperatures, the optimal relative thermal conductivity values of nanofluids with different weights of SDS were obtained. It has been observed that relative thermal properties generally tend to increase with particle concentrations, and the stability and dispersion of nanofluids affect the thermophysical properties substantially.

NOMENCLATURE

Al_2O_3	Aluminum Oxide
SDS	Sodium Dodecyl Sulfate
CNT	Carbon Nanotube
CB	Carbon Black
CTAB	Cetyl Trimethyl Ammonium Bromide
SDBS	Sodium Dodecylbenzenesulfonate
PVP	Polyvinylpyrrolidone
rGO	Reduced Graphene Oxide
EG	Ethylene Glycol
C-MWNT	Carbon-Multiwall Nanotubes
CMC	Critical Micelle Concentration
HLB	Hydrophile–Lipophile Balance
ρ_r	Relative Density
μ_r	Relative Viscosity
k_r	Relative Thermal Conductivity

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by Bursa Technical University Scientific Research Project (BAP) (grant number 190Y011).

REFERENCES

- Ali, A. R. I., Salam, B. A., 2020, "Review on nanofluid: preparation, stability, thermophysical properties, heat transfer characteristics and application", *SN Applied Sciences*, Vol. 2, pp. 1636.
- Altun, A., Şara, O. N., 2021, "Thermal Conductivity and Viscosity Correlations in Different Kinds of Aqueous Surfactant Solutions at Atmospheric Pressure as a Function of Temperature", *International Journal of Thermophysics*, Vol. 42, No. 1, pp. 1–19.
- Altun, A., Şara, O. N., Şimşek, B., 2021, "A comprehensive statistical approach for determining the effect of two non-ionic surfactants on thermal conductivity and density of Al_2O_3 –water-based nanofluids", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 626, pp. 127099.
- Assael, M. J., Chen, C. F., Metaxa, I., Wakeham, W. A., 2004, "Thermal conductivity of suspensions of carbon nanotubes in water", *International Journal of Thermophysics*, Vol. 25, No. 4, pp. 971–985.
- Azizian, M. R., Aybar, H. Ş., Okutucu, T., 2009, "Effect of nanoconvection due to Brownian motion on thermal conductivity of nanofluids", *Proceedings of the 7th IASME / WSEAS International Conference on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment, HTE '09, Moscow, Russia*, 53–56, 20–22 August 2009.
- Batchelor, G. K., 1977, "The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 83, No. 1, pp. 97–117.
- Choudhary, R., Khurana, D., Kumar, A., Subudhi, S., 2017, "Stability analysis of Al_2O_3 /water nanofluids", *Journal of Experimental Nanoscience*, Vol. 12, No. 1, pp. 140–151.

- Das, P. K., Islam, N., Santra, A. K., Ganguly, R., 2017, "Experimental investigation of thermophysical properties of Al₂O₃-water nanofluid: Role of surfactants", *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 237, pp. 304–312.
- Galioglu Atıcı, O., 2016, *Yüzey aktif maddeler kimyası ve endüstriyel uygulamalar*, İTÜ Vakfı, İstanbul.
- Hwang, Y., Lee, J., Lee, J., Jeong, Y., Cheong, S., Ahn, Y., Kim, S. H., 2008, "Production and dispersion stability of nanoparticles in nanofluids", *Powder Technology*, Vol. 186, pp. 145–153.
- Jarahnejad, M., Haghghi, E. B., Saleemi, M., Nikkam, N., Khodabandeh, R., Palm, B., Toprak, M. S., Muhammed, M., 2015, "Experimental investigation on viscosity of water-based Al₂O₃ and TiO₂ nanofluids", *Rheologica Acta*, Vol. 54, No. 5, pp. 411–422.
- Jha, J. M., Ravikumar, S. V., Tiara, A. M., Sarkar, I., Pal, S. K., Chakraborty, S., 2015, "Ultrafast cooling of a hot moving steel plate by using alumina nanofluid based air atomized spray impingement", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 75, pp. 738–747.
- Khairul, M. A., Shah, K., Doroodchi, E., Azizian, R., Moghtaderi, B., 2016, "Effects of surfactant on stability and thermo-physical properties of metal oxide nanofluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 98, pp. 778–787.
- Kleinstreuer, C., Feng, Y., 2011, "Experimental and theoretical studies of nanofluid thermal conductivity enhancement: A review", *Nanoscale Research Letters*, Vol. 6, No. 1.
- Lee, S. W., Park, S. D., Kang, S., Bang, I. C., Kim, J. H., 2011, "Investigation of viscosity and thermal conductivity of SiC nanofluids for heat transfer applications", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, pp. 433–438.
- Li, X. F., Zhu, D. S., Wang, X. J., Wang, N., Gao, J. W., Li, H., 2008, "Thermal conductivity enhancement dependent pH and chemical surfactant for Cu-H₂O nanofluids", *Thermochimica Acta*, Vol. 469, pp. 98–103.
- Longo, G. A., Zilio, C., 2011, "Experimental measurement of thermophysical properties of oxide-water nano-fluids down to ice-point", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 35, pp. 1313–1324.
- Ma, M., Zhai, Y., Yao, P., Li, Y., Wang, H., 2021, "Effect of surfactant on the rheological behavior and thermophysical properties of hybrid nanofluids", *Powder Technology*, Vol. 379, pp. 373–383.
- Meibodi, M. E., Vafaie-Sefti, M., Rashidi, A. M., Amrollahi, A., Tabasi, M., Kalal, H. S., 2010, "The role of different parameters on the stability and thermal conductivity of carbon nanotube/water nanofluids", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 319–323.
- Meyer, J. P., Nwosu, P. N., Sharifpur, M., Ntumba, T., 2012, "Parametric analysis of effective viscosity models for nanofluids", *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*, Texas, 1149–1157, 9–15 November 2012.
- Meyer, J. P., Adio, S. A., Sharifpur, M., Nwosu, P. N., 2016, "The Viscosity of Nanofluids: A Review of the Theoretical, Empirical, and Numerical Models", *Heat Transfer Engineering*, Vol. 37, No. 5, pp. 387–421.
- Michaelides, E. E., 2013, "Transport properties of nanofluids. A critical review", *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, Vol. 38, No. 1, pp. 1–79
- Mohajeri, E., Noudeh, G. D., 2012, "Effect of temperature on the critical micelle concentration and micellization thermodynamic of nonionic surfactants: Polyoxyethylene sorbitan fatty acid esters", *E-Journal of Chemistry*, Vol. 9, No. 4, pp. 2268–2274.
- Nair, V., Parekh, A. D., Tailor, P. R., 2018, "Water-based Al₂O₃, CuO and TiO₂ nanofluids as secondary fluids for refrigeration systems: a thermal conductivity study", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 40, No. 5.
- Pastoriza-Gallego, M. J., Casanova, C., Legido, J. L., Piñeiro, M. M., 2011, "CuO in water nanofluid: Influence of particle size and polydispersity on volumetric behaviour and viscosity", *Fluid Phase Equilibria*, Vol. 300, pp. 188–196.

- Rao, B. S., Ravi Babu, S., 2019, "Experimental Investigation on Natural Convection Heat Transfer Augmentation with Vibration Effect", *International Research Journal of Engineering and Technology*, Vol. 6, No. 8.
- Sayan, P., Sargut, S. T., Kiran, B., 2009, "Calcium oxalate crystallization in the presence of amino acids, proteins and carboxylic acids", *Crystal Research and Technology*, Vol. 44, No. 8, pp. 807–817.
- Schramm, L. L., Stasiuk, E. N., Marangoni, D. G., 2003, "Surfactants and their applications", *Annual Reports on the Progress of Chemistry - Section C*, Vol. 99, pp. 3–48.
- Sezer, N., Atieh, M. A., Koç, M., 2019, "A comprehensive review on synthesis, stability, thermophysical properties, and characterization of nanofluids", *Powder Technology*, Vol. 344, pp. 404–431.
- Shah, S. N. A., Shahabuddin, S., Sabri, M. F. M., Salleh, M. F. M., Ali, M. A., Hayat, N., Sidik, N. A. C., Samykan, M., Saidur, R., 2020, "Experimental investigation on stability, thermal conductivity and rheological properties of rGO/ethylene glycol based nanofluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 150.
- Sharma, A. K., Tiwari, A. K., Dixit, A. R., 2016, "Rheological behaviour of nanofluids: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 53, pp. 779–791.
- Singh, K., Sharma, S. K., Gupta, S. M., 2020, "Preparation of Long Duration Stable CNT Nanofluid Using SDS", *Integrated Ferroelectrics*, Vol. 204, No. 1, pp. 11–22.
- Singh, V., Tyagi, R., 2014, "Unique Micellization and CMC Aspects of Gemini Surfactant: An Overview", *Journal of Dispersion Science and Technology*, Vol. 35, No. 12, pp. 1774–1792.
- Suganthi, K. S., Rajan, K. S., 2017, "Metal oxide nanofluids: Review of formulation, thermo-physical properties, mechanisms, and heat transfer performance", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 76, pp. 226–255.
- Syam Sundar, L., Venkata Ramana, E., Singh, M. K., Sousa, A. C. M., 2014, "Thermal conductivity and viscosity of stabilized ethylene glycol and water mixture Al₂O₃ nanofluids for heat transfer applications: An experimental study", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 56, pp. 86–95.
- Vajjha, R. S., Das, D. K., Kulkarni, D. P., 2010, "Development of new correlations for convective heat transfer and friction factor in turbulent regime for nanofluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 4607–4618.
- Wang, L., Chen, H., Witharana, S., 2013, "Rheology of Nanofluids: A Review", *Recent Patents on Nanotechnology*, Vol. 7, No. 3, pp. 232–246.
- Wang, X., J., Zhu, D. S., Yang, S., 2009, "Investigation of pH and SDBS on enhancement of thermal conductivity in nanofluids", *Chemical Physics Letters*, Vol. 470, pp. 107–111.
- Wang, X., Xu, X., Choi, S. U. S., 1999, "Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture", *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 13, No. 4, pp. 474–480.
- Xia, G., Jiang, H., Liu, R., Zhai, Y., 2014, "Effects of surfactant on the stability and thermal conductivity of Al₂O₃/de-ionized water nanofluids", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 84, pp. 118–124.
- Zareei, M., Yoozbashizadeh, H., Madaah Hosseini, H. R., 2019. "Investigating the effects of pH, surfactant and ionic strength on the stability of alumina/water nanofluids using DLVO theory", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 135, No. 2, pp. 1185–1196.
- Zhai, Y., Li, L., Wang, J., Li, Z., 2019, "Evaluation of surfactant on stability and thermal performance of Al₂O₃-ethylene glycol (EG) nanofluids", *Powder Technology*, Vol. 343, pp. 215–224.
- Zhang, X., Gu, H., Fujii, M., 2006, "Experimental study on the effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids", *International Journal of Thermophysics*, Vol. 27, No. 2, pp. 569–580.



PRESSURE DEPENDENCIES OF RELATIVE CHANGE IN ELECTRICAL RESISTANCE, GAGE FACTOR AND POISSON'S RATIO IN BARE OPTICAL FIBERS

Abdurrahman GÜNDAY

Bursa Uludağ University, Faculty of Engineering, Department of Electrical & Electronics Engineering, Bursa,
TURKIYE
agunday@uludag.edu.tr

Geliş/Received: 15.04.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 29.06.2022

ABSTRACT: In this paper, a distributed sensing method relying on the principle of pressure dependencies of relative change in electrical resistance, gage factor and Poisson's ratio of the bare optical fiber core has been proposed. Using this method, besides the pressure information, relations between pressure and relative change in electrical resistance, gage factor and Poisson's ratio of the bare optical fiber core have been examined and then the temperature dependencies of these parameters have been mathematically analyzed and matching simulations have also been carried out in Matlab R2021b and Simulink environments. Moreover, first-order equations expressing the relations between these parameters and their temperature dependencies have been derived benefiting from the curve-fitting method. For pressure variations in the range of 2.2×10^7 Pa – 12×10^7 Pa, relative changes in electrical resistance of the fiber core have been obtained in the range of 0.41×10^{-3} – 2.13×10^{-3} . In other words, the pressure dependence of relative change in electrical resistance of the fiber core can be expressed as $1.841 \times 10^{-2} R_{rc}(\text{GPa})^{-1}$, i.e. 1 GPa pressure variation occurring along the fiber core causes about 0.01841 unit of R_{rc} variation. Furthermore, pressure dependencies of the gage factor and Poisson's ratio have been acquired as $2.924 \times 10^{-2} \text{GF}(\text{GPa})^{-1}$ and $1.462 \times 10^{-2} \sigma(\text{GPa})^{-1}$, respectively.

Keywords: Distributed pressure sensing, Bare optical fiber, Relative change in electrical resistance of optical fiber core, Pressure, Gage factor, Poisson's ratio, Temperature

Kılıfsız Optik Fiberlerde Bağlı Direnç Değişimi, Gage Faktörü ve Poisson Oranı'nın Basınç Bağımlılıkları

ÖZ: Bu makalede, kılıfsız optik fiber çekirdeğine ait bağlı direnç değişimi, gage faktörü ve Poisson oranının basınç bağımlılıkları prensibine dayalı bir dağılık algılama metodu önerilmiştir. Bu metot kullanılarak, basınç bilgilerinin yanı sıra, basınç ile kılıfsız optik fiber çekirdeğinin bağlı direnç değişimi, gage faktörü ve Poisson oranı arasındaki ilişki incelenmiş ve ardından bu parametrelerin sıcaklık bağımlılıkları matematiksel olarak analiz edilmiş ve ayrıca ilgili benzetimler Matlab R2021b ve Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak, bu parametreler ve bu parametrelerin sıcaklık bağımlılıkları arasındaki ilişkileri ifade eden birinci dereceden denklemler, eğri uydurma metodundan yararlanılarak türetilmiştir. Basıncın 2.2×10^7 Pa – 12×10^7 Pa aralığındaki değişimi için fiber çekirdeğine ait bağlı direnç değişimleri 0.41×10^{-3} – 2.13×10^{-3} aralığında elde edilmiştir. Diğer bir ifadeyle, fiber çekirdeğinin bağlı direnç değişiminin basınç bağımlılığı $1.841 \times 10^{-2} R_{rc}(\text{GPa})^{-1}$ olarak ifade edilebilmektedir, yani fiber çekirdeği boyunca meydana gelen 1 GPa değerinde basınç değişimi, R_{rc} değerinde yaklaşık olarak 0.01841 birimlik değişime neden olmaktadır. Ayrıca, gage faktörünün ve

Poisson oranının basınç bağımlılıkları, sırasıyla $2.924 \times 10^{-2} \text{ GF(GPa)}^{-1}$ ve $1.462 \times 10^{-2} \sigma(\text{GPa})^{-1}$ olarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dağılık basınç algılama, Kılıfsız optik fiber, Optik fiber çekirdeğinin bağıl direnç değişimi, Basınç, Gage faktörü, Poisson oranı, Sıcaklık

1. INTRODUCTION

In the optical fiber-based distributed sensing and detection systems where the physical formations such as pressure, temperature, acoustic and strain formations are detected, in particular Brillouin, Raman and Rayleigh scattering schemes are exploited. In the last decade, applications of optical fiber-based distributed sensing systems have been increasing due to the growing need for enhanced sensing systems with accurate measurement capabilities. In this regard, scientific developments accomplished in the fields of optical fiber sensing and detection systems give opportunities to detect all kinds of measurands, simultaneously (Yu, 2006; Pehlivan, 2007; Chen *et al.*, 2015; He *et al.*, 2016; Ding *et al.*, 2018; Schenatoa *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2020; Arslan and Bayrak, 2022). Nevertheless, with the aid of innovative improvements performed in the material science, utilization of the characteristic properties of optical fiber core has become useful and favorable for getting information simultaneously about the physical measurands such as temperature, pressure, vibration and acoustic formations occurring in the working medium (Gu *et al.*, 2012; Boydak and Yücel, 2017; Gökbulut *et al.*, 2017; Günday *et al.*, 2018; Bilsel and Navruz, 2020).

In this paper, relations between pressure formations along the bare optical fiber and relative change in electrical resistance of the fiber core have been theoretically analyzed and hereby a different alternative approach in terms of sensing principle to the pressure transducers like strain-gage, load cell and piezoresistive pressure detectors has been proposed. In other words, a novel sensing method for measurements of distributed pressure formations which in principle is based on the pressure dependence of relative change in electrical resistance has been put forward. The pressure induced by the force applied to a substance causes the longitudinal and lateral stresses and strain formations on the substance and leads to variations in its elasticity modulus, as well. For this reason, pressure effects arising along the optical fiber can cause to stretch the optical waveguide and hence induces the strain formations through the bare optical fiber and thus vary the relative change in electrical resistance, gage factor and Poisson's ratio of the fiber core. Therefore, pressure dependencies of relative change in electrical resistance, gage factor and Poisson's ratio of the bare fiber core have been investigated and the mathematical equations have been derived in Matlab 2021b and Simulink environments in this study.

2. MATERIAL AND METHOD

The pressure applied to a matter is defined as the ratio of the force applied on a matter and the surface area influenced by the force. In other words, pressure formations can be stated as a function of the elasticity modulus which is the ratio of stress, below the proportional limit, to the corresponding strain formations as given with (Sokkar, 2012; Günday *et al.*, 2014; İrsel, 2021)

$$P = \frac{F}{A} = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

where P is the pressure formation, F is the external force acting on the object, A is the cross-sectional area of the object, E is the elasticity modulus and ε is the mechanical strain formation, respectively.

The mechanical strain is generally caused by external loads and constraints. In this context, the combined effect of thermal formation in the medium and the mechanical strain which is a geometrical measurement of deformation describing the relative displacement between particles in a matter causes a relative change in the electrical resistance of the matter. The relative change in electrical resistance $\Delta R/R$ (R_c) is a characteristic parameter that can be formulated by (Tuttle and Brinson, 1984)

$$R_{rc} = \varepsilon \cdot GF + \alpha \cdot \Delta T \quad (2)$$

where GF denotes the gauge factor or strain factor of a strain gauge, α and ΔT denote the temperature coefficient and temperature difference, respectively. Temperature coefficient α of the bare optical fiber core used in the sensing model in this study has been taken as $5.5 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{K}$.

The gage factor shows a change depending on Poisson's ratio which is an important material characteristic utilized for determining the elasticity of the substance and the strain formation for the materials having strong resistive properties. When a substance is compressed in one direction, Poisson's ratio generally tends to enlarge in the other two directions perpendicular to the direction of compression. This event is called the Poisson's effect in the literature and Poisson's ratio (σ) is stated as a measure of the Poisson's effect (Wang, 2012; Carneiro and Puga, 2018).

The change in resistivity ($\Delta\rho$) for the materials such as optical fiber is assumed as zero, i.e. $\Delta\rho = 0$, for this reason gage factor (GF) of a given material is expressed with

$$GF = 1 + 2\sigma \quad (3)$$

where σ is the Poisson's ratio of the substance (Wang 2012).

On the other hand, the gage factor or strain factor can be described as a ratio of the relative change in electrical resistance to the mechanical strain. For the temperature value of the optical fiber at 293 °K, Poisson's ratio (σ) is 0.165 and the change in resistivity ($\Delta\rho$) is zero, thus GF is computed as 1.331, approximately (De Souza 1999; Írsel, 2021; Sanchez *et al.*, 2022).

Since the Poisson's ratio changes linearly due to the temperature variations (De Souza 1999), both the gage factor and the pressure formations occurring along the bare optical fiber core vary with ambient temperature, linearly. In other words, as the temperature varies in the medium, the gage factor and the pressure formations are influenced by thermal variations of the medium. If there are no temperature gradient ($\Delta T = 0$) and temperature effects in the medium or sensing system, the gage factor changes only with strain formations. However, if temperature variations occur in the sensing system, making use of (1) and (2) pressure formations $P(R_{rc})$ occurring along the entire length of the bare optical fiber core can be formulated as

$$P(R_{rc}) = \frac{1}{GF} \cdot E \cdot (R_{rc} - \alpha \cdot \Delta T) \quad (4)$$

where $P(R_{rc})$ is the pressure formations along the bare optical fiber core and E is the elasticity modulus of the fiber core in terms of GPa.

In this paper, the relative change in electrical resistance of bare optical fiber core, gage factor, Poisson's ratio and temperature variations depending on the pressure effects have been analyzed and the simulations related to their dependencies have been performed utilizing the optical fiber-based distributed pressure sensing (DPS) model shown in Figure 1. In this DPS model exploiting the BOTDR principle which is based on the interaction of photons propagating inside the sensing fiber with acoustic waves, optical pulses launched into the sensing fiber are produced by distributed feedback laser (DFB-LD) with the output power of 2 mW and pulse duration of 10 ns. The sensing fiber used in the model constructed for getting pressure information is bare optical fiber, i.e. standard communication single-mode fiber (SMF) operating at 1550 nm.

The sensing fiber, i.e. bare optical fiber is exposed to pressure effects generated by the sensing equipment used in the model for producing pressure formations along the fiber. The optical signal pumped by the laser into the bare optical fiber is amplified via EDFA (Erbium-doped fiber amplifier) and then routed towards the AOM (Acousto-optic modulator) to suppress the ASE noise at the output end of EDFA and modulate the signal via acousto-optic effect. The directional coupler positioned in the sensing model has two arms that are connected to the AOM and photodetector. It is used for directing the optical signal towards the fiber under pressure (FUP), i.e. bare optical fiber with the length of 900 m and routed

the backscattered optical signal to the photodetector to detect pressure formations occurring along the fiber. Finally, a photodetector is employed to convert incident light into the electrical signal and then the spectrum analyzer and the oscilloscope visualizer are exploited for getting frequency information and monitoring the output signal to accomplish the computational analysis, consecutively. Afterward, using the output electrical signal, corresponding simulations relevant to all the parameters are obtained in Matlab R2021b and Simulink environments.

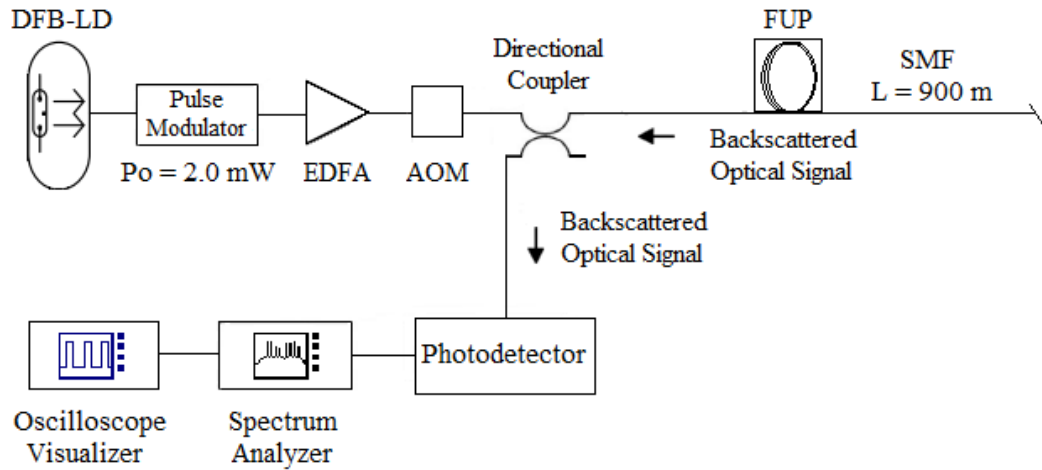


Figure 1. Optical fiber-based distributed pressure sensing (DPS) model

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

Mathematical analysis and the simulations concerning the pressure variations, relative change in electrical resistance, gage factor, Poisson's ratio and ambient temperature have been performed via Matlab R2021b utilizing the sensing model shown in Figure 1. Parameters of the sensing fiber, i.e. bare optical fiber in the model for making analysis and getting simulations are given as the following: wavelength of the optical signal (λ) pumped by distributed feedback laser (DFB-LD) is 1550 nm, the core and the cladding refractive indices (n_1 and n_2) are 1.475 and 1.455, respectively. Rayleigh and Brillouin scattering coefficients (α_R and α_B) at 1550 nm are $3.5686 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ and $1.1071 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$, respectively. The spatial resolution (Δz) of the DPS model is 1.01625 m, the length of the bare optical fiber (L) is 900 m and the number of distributed measurement points ($R = L/\Delta z$) along the fiber length is 886.

Figure 2 shows the linear relation between pressure variation and relative change in electrical resistance of the bare optical fiber core. As is seen in Figure 2, as the pressure effect existing along the fiber increases, the relative change in electrical resistance of the fiber core shows tendency to increase linearly. This linearity between pressure effects and the relative changes in electrical resistance of the fiber core is caused by the dielectric property of the fiber core and so is important for designing the possible fiber-based pressure transducers in practical applications.

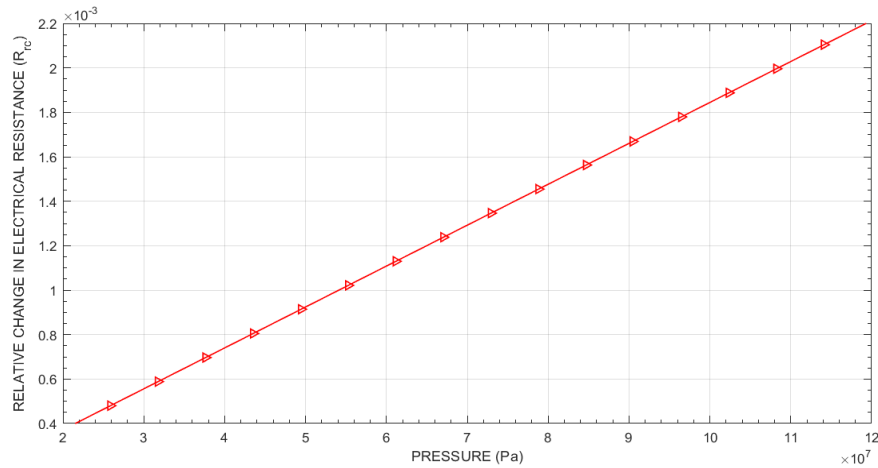


Figure 2. Relative change in electrical resistance versus pressure variation

Using (3), both the pressure dependence of relative change in electrical resistance ($R_{rc}(P)$) of the bare optical fiber core and the pressure variation as a function of relative change in electrical resistance ($P(R_{rc})$) can be formulated as given in (5) and (6)

$$R_{rc}(P) = 1.841 \times 10^{-11} P + 3.815 \times 10^{-6} \tag{5}$$

$$P(R_{rc}) = 5.433 \times 10^{10} R_{rc} + 2.073 \times 10^5 \tag{6}$$

respectively, where P and R_{rc} denote the pressure variation and the relative change in electrical resistance of the fiber core, respectively.

From (4), it can be stated that the relative change in electrical resistance (R_{rc}) dependence of the pressure variation is $54.33 \text{ GPa}(R_{rc})^{-1}$. In other words, a change in the R_{rc} value of 1 unit, induces the variation in pressure value of 54.33 GPa, approximately. From another point of view, 1 GPa pressure effect occurring along the fiber core causes about 0.01841 unit in value of R_{rc} . For the relative change in electrical resistance of the bare optical fiber core in the range of $0.4 \times 10^{-3} - 2.2 \times 10^{-3}$, pressure values show a change in the range of 20 MPa – 120 MPa. Pressure formation along the bare optical fiber core gets its average value of about 65 MPa for the relative change in electrical resistance (R_{rc}) value of 1.2×10^{-3} .

The pressure formations occurring along the bare optical fiber core with varying gage factor values are obtained using (4) as shown in Figure 3.

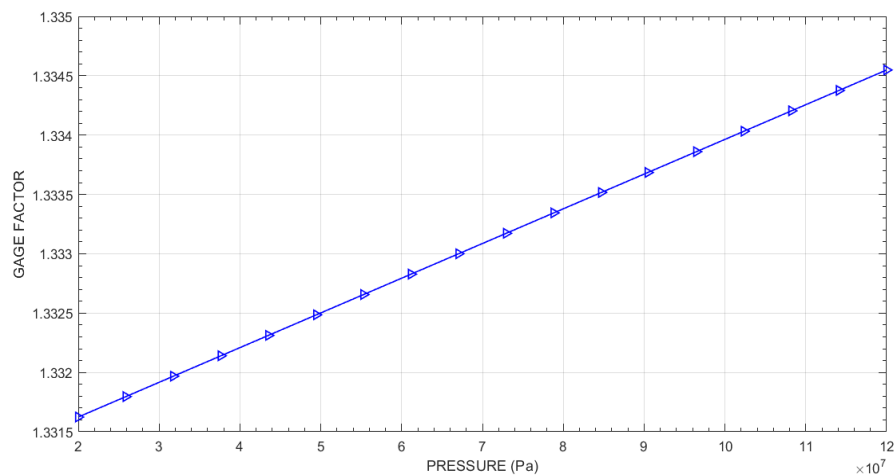


Figure 3. Gage factor changes versus pressure variations in the range of 1.3316 – 1.3345

There is a linear relation between pressure and gage factor variations as unambiguously seen in

Figure 3. The gage factor gets its minimum and maximum values of 1.3316 and 1.3345, respectively for pressure variations in the range of 2.2×10^7 Pa – 12×10^7 Pa.

Making use of the simulation represented in Figure 3 and the curve-fitting tool in Matlab R2021b, first-order equations describing the relations between pressure variations occurring along the bare optical fiber and change in the gage factor of the fiber core can be written by (7) and (8)

$$GF(P) = 2.924 \times 10^{-11} P + 1.331 \quad (7)$$

$$P(GF) = 3.420 \times 10^{10} GF - 4.552 \times 10^{10} \quad (8)$$

respectively, where $GF(P)$ is the gage factor of the bare optical fiber and $P(GF)$ is the pressure variation depending on the gage factor of the fiber core in terms of Pa.

The plot representing the changes in Poisson's ratio due to the pressure formations occurring along the optical fiber is indicated in Figure 4.

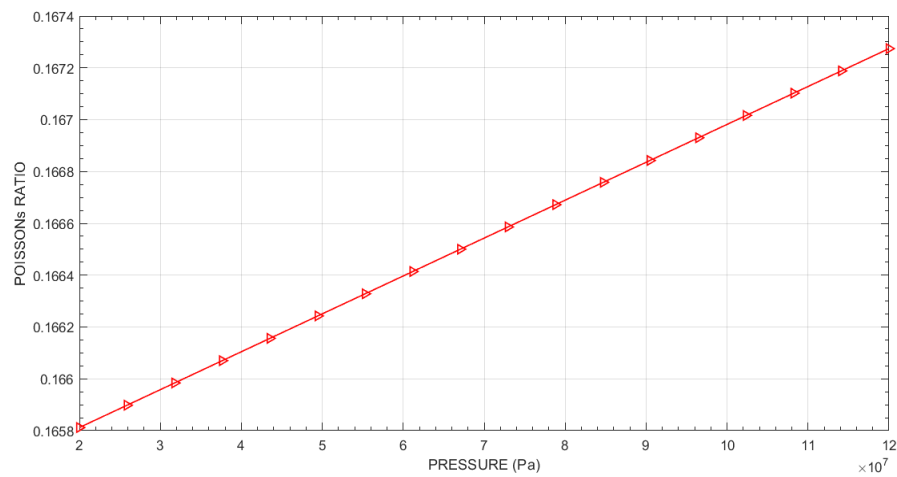


Figure 4. Poisson's ratio versus pressure variation

As is seen in this figure, there is a linear relationship between pressure variation and Poisson's ratio, similar to that of pressure variation with the relative change in electrical resistance and gage factor of the fiber core. In other words, an increase in the value of pressure causes the increase in the values of Poisson's ratio, gage factor and relative change in electrical resistance of the fiber core due to the material compositions both of the core and the cladding of the bare optical fiber.

First-order equations expressing both the Poisson's ratio as a function of pressure variation and the Poisson's ratio dependence of pressure variation can be written in (9) and (10)

$$\sigma(P) = 1.462 \times 10^{-11} P + 0.1655 \quad (9)$$

$$P(\sigma) = 6.839 \times 10^{10} \sigma - 1.132 \times 10^{10} \quad (10)$$

respectively, where σ is the Poisson's ratio of bare optical fiber.

Using Figure 4 and (9) and (10), for Poisson's ratio variations in the range of 0.1658 – 0.1673, pressure values change in the range of 2.2×10^7 Pa – 12×10^7 Pa.

The pressure variations depending on the temperature formations occurring along the bare optical fiber are plotted as illustrated in Figure 5. It is obvious in Figure 5, thermal effects generated in the medium, i.e. temperature formations occurring along the bare optical fiber induce the pressure variations through the entire length of the fiber core.

The linear equation pointing out temperature dependence of pressure variation is derived from the simulation shown in Figure 5 as stated in (11).

$$P(T) = 1.974 \times 10^6 T - 5.827 \times 10^8 \quad (11)$$

For temperature variations in the range of 300 °K – 500 °K, pressure formations change in the range of 0.095×10^8 Pa – 4.5×10^8 Pa, approximately.

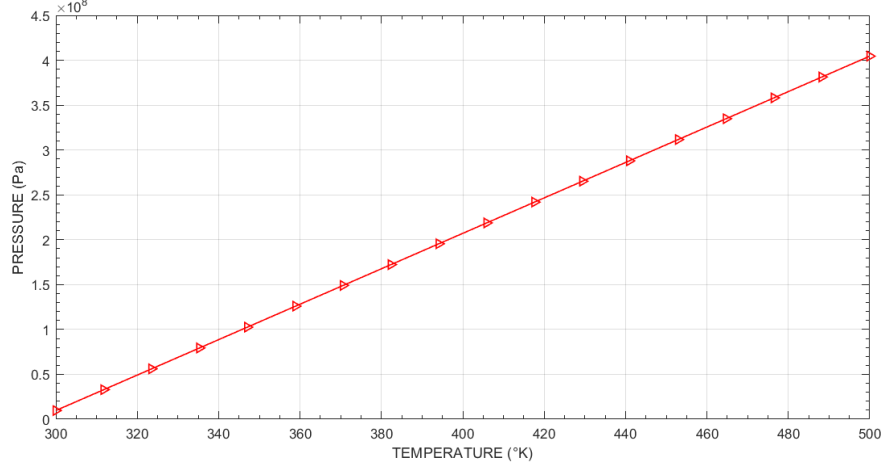


Figure 5. Pressure variations for temperature changes in the range of 300 °K – 500 °K

Using the simulation illustrated in Figure 5, the temperature dependence of pressure is computed as about 1.974×10^6 Pa/°K. In other words, a 1 °K variation in the temperature of the fiber core causes a 1.974 GPa variation in pressure formation occurring along the bare optical fiber.

The simulation result obtained for the correlation between relative change in electrical resistance and the temperature of the fiber core is shown in Figure 6.

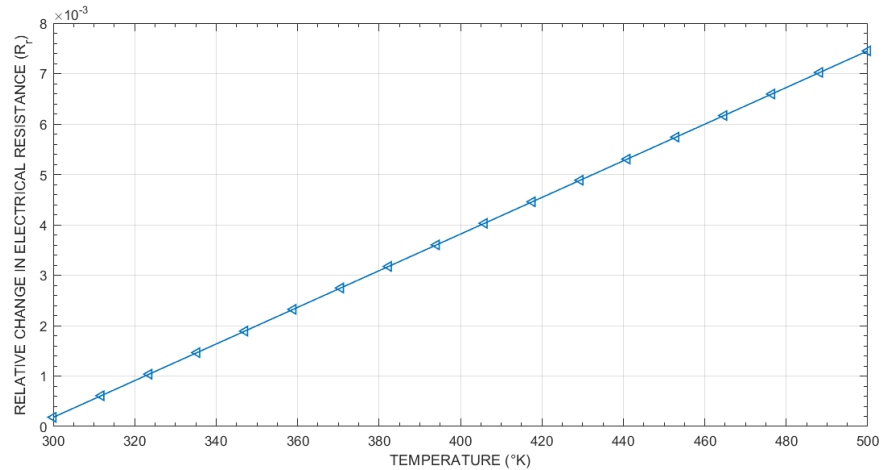


Figure 6. Relative change in electrical resistance of the fiber core with varying temperature

As obviously seen in the figure, relative change in electrical resistance of the bare optical fiber core changes linearly with temperature variation.

Using data of the parameters obtained from the simulation represented in Figure 6, a linear equation expressing temperature dependence of relative change in electrical resistance of the fiber core can be written as

$$R_{rc}(T) = 3.634 \times 10^{-5} T - 0.01072 \quad (12)$$

where R_{rc} is the relative change in electrical resistance of the fiber core and T is the temperature of the fiber core, respectively.

For temperature variations in the range of 300 °K – 500 °K, changes of R_{rc} are obtained in the range of

$0.0109 \times 10^{-3} - 7.45 \times 10^{-3}$ along the bare optical fiber.

Figure 7 illustrates the gage factor variations in the range of 1.33132 – 1.34287 due to the temperature formations changing from 300 °K to 500 °K. In other words, for temperature values of 300 °K and 500 °K, the gage factor reaches to its minimum and maximum values with 1.33132 and 1.34287, respectively.

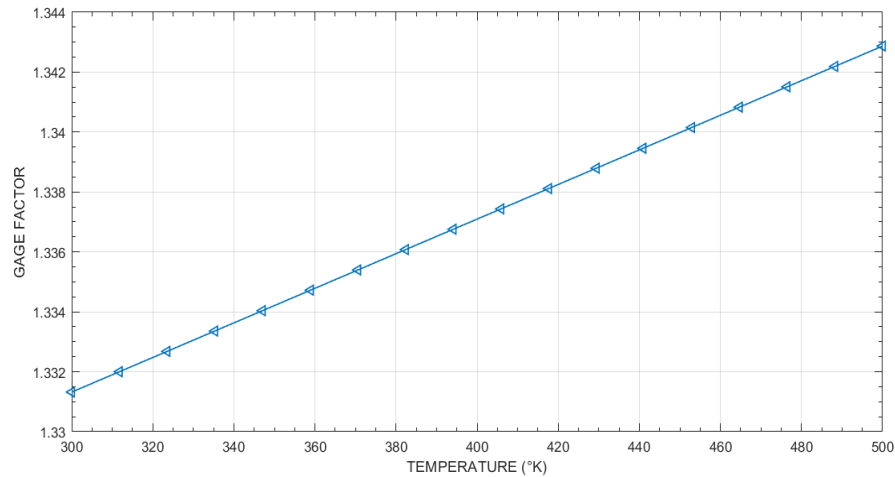


Figure 7. Gage factor versus temperature variation.

Using the mathematical method employing the curve-fitting tool in Matlab R2021b, the gage factor is expressed as

$$GF(T) = 5.774 \times 10^{-5} T + 1.314 \quad (13)$$

where GF is the gage factor and T is the temperature of the core in terms of Kelvin.

Taking the first-order derivative of (10), the temperature dependence of the gage factor is found as $5.774 \times 10^{-5} \text{ GF}(\text{K}^{-1})$. It is useful for evaluating the sensing system performance depending on the gage factor or strain factor of the fiber core and well suited to the findings and the research studies accomplished in the literature.

4. CONCLUSION

This research paper presents a method for distributed measurements of pressure formations utilizing the relations between pressure and particularly the relative change in electrical resistance of the bare optical fiber core. To perform this method a model has been constructed and then both the pressure dependencies of relative change in electrical resistance, gage factor, Poisson's ratio of the fiber core and the relations between these parameters and temperature variations in the range of 300 °K – 500 °K have been mathematically analyzed and thus corresponding simulations have been performed in Matlab 2021b/Simulink environment. Within this scope, linear equations related to these parameters have also been derived by exploiting the curve-fitting method.

Benefiting from the equations and the simulation results obtained in this study, pressure dependence of relative change in electrical resistance of the fiber (R_{rc}) has been found as $1.841 \times 10^{-11} R_{rc}(\text{Pa})^{-1}$ whilst R_{rc} dependence of pressure variation has been computed as $5.433 \times 10^{10} \text{ Pa}(R_{rc})^{-1}$. On the other hand, pressure dependencies of the gage factor and Poisson's ratio have been acquired as $2.924 \times 10^{-2} \text{ GF}(\text{GPa})^{-1}$ and $1.462 \times 10^{-2} \sigma(\text{GPa})^{-1}$, respectively. Furthermore, for temperature variations between 300 °K and 500 °K, pressure changes, gage factor and Poisson's ratio have been obtained as a function of temperature as $1.974 \times 10^6 \text{ Pa}/^\circ\text{K}$, $3.634 \times 10^{-5} R_{rc}/^\circ\text{K}$ and $5.774 \times 10^{-5} \text{ GF}/^\circ\text{K}$, respectively.

Moreover, this research provides an innovative and different approach from the similar studies fulfilled in the literature in terms of the sensing method used for distributed measurements of the pressure variations and getting information about the relative change in electrical resistance, gage factor and

Poisson's ratio of the bare optical fiber. Consequently, it may form an important and valuable background for future investigations and empirical applications to be performed in the field and can be considered to be the best candidate to meet the requirements both in distributed sensing systems and strain gauge implementations in electronics so far.

5. DECLARATION OF INTERESTS

The author declares that he has no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

REFERENCES

- Arslan, M. M., Bayrak, G., 2022, "Temperature Compensation of FBG Sensors via Sensor Packaging Approach for Harsh Environmental Applications, Gazi University Journal of Science, 35 (4), 1471 – 1482.
- Bilsel, M., Navruz, İ., 2020, "Concatenated Up and Down Tapered Fiber for Simultaneous Measurements of Strain and Temperature", Communications Faculty of Sciences University of Ankara Series A2 – A3, 62 (2), 164 – 176.
- Boydak, S., Yücel, M., 2017, "The Analysis of Raman Scattering in the Fiber Optic Cable", Journal of Polytechnic, 20 (2), 257 – 265.
- Carneiro, V.H. and Puga, H., 2018, "Temperature Variability of Poisson's Ratio and Its Influence on the Complex Modulus Determined by Dynamic Mechanical Analysis", Technologies, (6) 81.
- Chen, D., Liu, Q., Fan, X., He, Z., 2015, "Distributed Fiber – Optic Acoustic Sensor with Enhanced Response Bandwidth and High Signal – to – Noise Ratio", Journal of Lightwave Technology, 14 (8).
- De Souza, K.R.C.P., 1999, Fiber Optic Distributed Sensing Based on Spontaneous Brillouin Scattering, Ph.D. Thesis, University of Southampton, UK.
- Ding, Z., Wang, C., Liu, K., Jiang, J., Yang, D., Pan, G., Pu, Z., Liu, T., 2018, "Distributed Optical Fiber Sensors Based on Optical Frequency Domain Reflectometry: A review", Sensors, 18 (1072), 1 – 31.
- Gökbulut, B., Güvenç, S., İnci, M. N., 2017, "Investigation of a Novel Temperature – Sensing Mechanism Based on Strain – Induced Optical Path – Length Difference in a Multicore Optical Fiber, Turkish Journal of Physics, 41 (5), 410 – 417.
- Gu, H., Dong, H., Zhang, G., He, J., Xu, N., J. Brown, D., 2012, "Pressure Dependence of Brillouin Frequency Shift in Bare Silica Optical Fibers", Chinese Optics Letters, 10 (10), 100604.
- Günday, A., Karlık, S.E., Yilmaz, G., 2014, "The Impact of Temperature and Strain Formations on Young and Shear Moduli in usage of Optical Fiber Distributed Sensing for Power Cables", Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 29 (3), 517 – 525.
- Günday, A., 2018, "Computational Analysis of the Core Refractive Index Dependencies of Brillouin Frequency Shift and Brillouin Power Change in Brillouin Coherent Detection Based Distributed Sensing Systems", Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communication, 12 (9 - 10), 502 – 511.
- He, H., Shao, L. Y., Li, Z., Zhang, Z., Zou, X., Luo, B., Pan, W., Yan, L., 2016, "Self – Mixing Demodulation for Coherent Phase-Sensitive OTDR System", Sensors, 16 (5), 681.
- İrsel, G., 2021, "Research on Electrical Strain Gages and Experimental Stress Analysis: Case Study for a Full Wheatstone Bridge, Dicle University Journal of Engineering (DUJE), 12 (5), 783 – 792.
- Li, H., Sun, Q., Liu, T., Fan, C., He, T., Yan, Z., Liu, D., Shum, P. P., 2020, "Ultra – High Sensitive Quasi – Distributed Acoustic Sensor Based on Coherent OTDR and Cylindrical Transducer", Journal of Lightwave Technology, 38 (4), 929 – 938.
- Pehlivan, C., 2007, Analysis of Fiber Bragg Grating Sensors, M.Sc. Thesis, Kocaeli University, Turkey.

- Sanchez, L.A., Diez, A., Cruz, J.L., Andres, M.V., 2022, "High Accuracy Measurement of Poisson's Ratio of Optical Fibers and Its Temperature Dependence Using Forward-Stimulated Brillouin Scattering", *Optics Express*, 30 (1/3), 42 – 52.
- Schenatoa, L., Galtarossab, A., Pasutoa, A., Palmieri, L., 2020, "Distributed Optical Fiber Pressure Sensors", *Optical Fiber Technology*, 58 (2020) 102239, 1 – 10.
- Sokkar, T.Z.N., Shams El – Din, M.A., El – Tawargy, A.S., 2012, "On Young's Modulus Profile Across Anisotropic Nonhomogeneous Polymeric Fibre Using Automatic Transverse Interferometric Method", *Optics and Lasers in Engineering*, 50 (9), 1223 – 1229.
- Tuttle, M.E., Brinson, H.F., 1984, "Resistance – Foil Strain – Gage Technology as Applied to Composite Materials", *Experimental Mechanics*, 24, 54 – 65.
- Wang, W.H., 2012, "The Elastic Properties, Elastic Models and Elastic Perspectives of Metallic Glasses", *Progress in Materials Science*, 57 (3), 487 – 656.
- Yu, Q., 2006, *Distributed Brillouin Sensing Using Polarization - Maintaining Fibers with High Measurement Accuracy*, Ph.D. Thesis, Ottawa – Carleton Institute for Physics, University of Ottawa, Canada.



THE INFLUENCE OF TANGENTIAL EDGE RESTRAINTS ON THE NONLINEAR RESPONSE OF LAMINATED COMPOSITE CYLINDRICAL PANELS SUBJECT TO A PINCHING FORCE

İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

Akdeniz University, Engineering Faculty, Civil Engineering Department, Antalya, TURKIYE
izzetufuk@akdeniz.edu.tr

Geliş/Received: 07.11.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 30.06.2022

ABSTRACT: In this study, the influence of straight edge tangential restraints on the nonlinear response of symmetrically laminated and balanced composite cylindrical panels subject to a pinching force is investigated. An 8-node degenerated nonlinear shell element, formulation of which is based on the Total Lagrangian Formulation, is employed for geometrically nonlinear analysis and the Arc-Length Method is used to trace the nonlinear path. First, the element is validated for geometrically non-linear analysis by solving two verification problems. Then, numerical results for different rotational boundary conditions are presented for two different stacking sequences, and thickness values. The numerical results presented show that there is no significant difference between the tangentially unrestrained and restrained clamped panels when only one edge is tangentially unrestrained. However, it is observed that the simply supported panels demonstrate a much less stiff behavior when one of the straight edges is tangentially unrestrained.

Keywords: Laminated composite, Panel, Post-Buckling, Tangential edge Rrstraints

Teğet Sınır Şartlarının Ortasından Tekil Yüklü Katmanlı Kompozit Silindirik Panellerin Nonlineer Davranışlarına Etkisi

ÖZET: Bu çalışmada, ortasından düşey tekil yük ile yüklü simetrik ve dengeli katmanlı kompozit silindirik panellerin nonlineer davranışlarında düz kenar teğet sınır şartlarının etkisi incelenmiştir. Bu maksatla, toplam Lagrange formülasyonuna dayanan sekiz düğümlü, dejenere ve doğrusal olmayan bir kabuk sonlu elemanı kullanılmıştır. Nonlineer davranışı gözlemleyebilmek için giriş uzunluğu yöntemi kullanılmıştır. Öncelikle bazı doğrulama problemleri çözülerek eleman geometrik açıdan doğrusal olmayan analiz için doğrulanmıştır. Daha sonra problem farklı dönel sınır şartları, kalınlık ve katman düzenleri için incelenmiştir. Ankastre paneller için elde edilen neticeler teğet doğrultuda her iki kenar veya sadece bir kenar tutulu olduğunda davranışta önemli bir fark olmadığını göstermektedir. Ancak, basit mesnetli paneller için elde edilen neticeler rijitliğinin sadece bir kenar teğetsel doğrultuda tutulduğunda önemli nispette düştüğünü göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Katmanlı kompozit, Silindirik panel, Nonlineer davranış, Teğetsel sınır şartları

1. INTRODUCTION

In this study, the influence of straight edge tangential restraints on the nonlinear response of symmetrically laminated and balanced composite cylindrical panels subject to a pinching force is investigated. Perfect geometry is assumed and ply failure is not considered.

Almroth (1966) has examined the influence of tangential edge restraints on buckling of cylindrical shells in an attempt to explain the discrepancy between theory and test data. The analytical results presented by Almroth (1996) show that setting the edges free in the tangential direction results in drastic

reductions of the critical load. The influence of the tangential edge restraints on the nonlinear response and post-buckling of cylindrical shell panels has first been studied by Librescu and Lin (1997). In a more recent study, Tung (2013) has stated that the tangential constraints at the straight edges have extremely sensitive influences on the nonlinear response and postbuckling of cylindrical panels made up of functionally graded materials. The influence of tangential edge constraints on the nonlinear stability of CNT reinforced cylindrical panels has been studied by Trang and Tung (2018) and Hieu and Tung (2019). In short, it is stated in the cited studies that cylindrical panels demonstrate a highly unstable post-buckling response without the presence of tangential edge restraints. However, there are no studies in the literature on the influence of rotational boundary conditions.

Especially for shallow panels, it is of great importance to be able to predict bifurcation buckling or the snap-through buckling load. A linear stability analysis may be helpful if stability loss is of bifurcation type. However, snap-through type instability can only be determined by conducting a geometrically nonlinear analysis. The main difficulty related with nonlinear analysis is tracing the post-buckling path and to overcome this difficulty, the Arc-length Method developed by Crisfield (1981) is used in this study. However, the sign criteria proposed by Crisfield (1981) and the one by Bergan *et al.* (1978) are found out to be problematic and not reliable. Therefore, the sign criterion proposed by Neto *et al.* (2011) is selected, which includes the deformation history. A slight modification to the Arc-length Method is made here to increase the rate of convergence.

A degenerated composite shell element based on the shell element developed by Mallikarjuna and Kant (1992) is used to conduct the related structural analyses. This same element was used by Cagdas and Adali (2012(a), 2012(b)) for linearized stability analysis and design optimization of composite panels. Modification of this element for geometrically nonlinear analysis is made here by making use of the incremental total Lagrangian formulation defined by Bathe and Bolourchi (1980) and Chao and Reddy (1984). Ram and Babu (2002), Panda and Singh (2009), Bakshi and Chakravorty (2014), Singha *et al.* (2006), Barbosa and Ferreira (2009), and Sit and Ray (2019) have used similar composite shell elements for nonlinear analysis of composite panels.

First, the results obtained for two verification problems are presented and then geometrically nonlinear finite element analysis results are presented for 2 different thickness and 4 different rotational boundary conditions. Finally, the influence of tangential edge restraints on the nonlinear response is investigated.

2. THE NUMERICAL SOLUTION PROCEDURE

2.1. The Incremental Total Lagrangian Formulation

The linearized form of the equation of motion for the i^{th} iteration according to Total Lagrangian (TL) formulation is given below in Eq. (1).

$$\left\{ \int_{0V} \left({}^t_0 \mathbf{B}_{L0} + {}^t_0 \mathbf{B}_{L1} \right)^T {}_0 \mathbf{C} \left({}^t_0 \mathbf{B}_{L0} + {}^t_0 \mathbf{B}_{L1} \right) {}^0 dV + \int_{0V} \left({}^t_0 \mathbf{B}_{NL} \right)^T \left({}^t_0 \mathbf{S} \right) \left({}^t_0 \mathbf{B}_{NL} \right) {}^0 dV \right\} \Delta \mathbf{u}^{(i)} = \dots$$

$${}^{t+\Delta t} \mathbf{R} - \int_{0V} \left({}^{t+\Delta t}_0 \mathbf{B}_L^{(i-1)} \right)^T \left({}^{t+\Delta t}_0 \mathbf{S}^{(i-1)} \right) {}^0 dV \quad (1)$$

where, the \mathbf{B} matrices are the strain-displacement matrices defined by Bathe and Bolurchi (1980), ${}^t_0 \mathbf{S}$ denotes the 2nd Piola-Kirchoff stresses at time t referred to the configuration at time $t=0$, ${}_0 \mathbf{C}$ denotes the components of the elasticity tensor at time 0, \mathbf{R} denotes the load vector, and the displacement increment $\Delta \mathbf{u}^{(i)}$ is defined below;

$$\Delta \mathbf{u}^{(i)} = {}^{t+\Delta t} \mathbf{u}^{(i)} - {}^{t+\Delta t} \mathbf{u}^{(i-1)}. \quad (2)$$

Note that, reduced (2×2) integration is used in this study to avoid shear locking; see Pawsey and Clough (1971).

2.2. The Displacement Components

The shell element is based on the following displacement field;

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^m \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix}_{mid} S_i(\xi, \eta) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m S_i \zeta \mathbf{V}_{3i} \quad (3)$$

where, m , $S_i(\xi, \eta)$, \mathbf{V}_{3i} denote the total number of nodes, the value of the i^{th} shape function at (ξ, η) , and the unit surface normal vector at node i . The ranges of ξ and η are -1 to 1 and the range of ζ is $-t/2$ to $t/2$, where t denotes the thickness of the element. The nodal rotations β_i , and α_i are shown in Fig. 1, see Cagdas and Adali (2012(a)) for details of derivation.

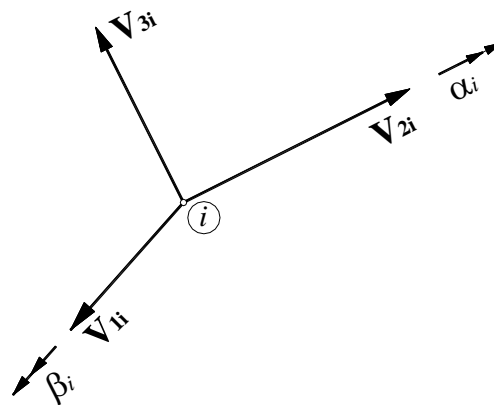


Figure 1. The global, and nodal coordinate systems

2.3. Solution of the Nonlinear Problem

The Arc-Length Method developed by Crisfield (1981) is used to solve the non-linear problem and the sign criteria proposed by Neto *et al.* (2011) is employed and a slight modification is made in the application of the Arc-Length Method. If the unbalanced loads tend to increase at a certain iteration step, then iterations are stopped to prevent divergence and the unbalanced load vector is added to the internal force vector of the next iteration. This problem may occur especially if the arc-length chosen is not suitable. This way, divergence is prevented, favorable results are obtained and it is found out that the unbalanced load diminishes rapidly.

2.4. Problem Definition

The geometry of the cylindrically curved composite panel considered in this study is shown in Fig. 2. The panel length, width, and thickness are denoted by a , b , and t respectively. The panels analyzed have a symmetrical stacking sequence and are constructed of six orthotropic layers of equal thickness $t/6$ and with fiber orientations θ_k where $k = 1, \dots, 3$. The lamination angle θ is shown in Fig. 2. The panels are subject to a pinching force P and no other loads are applied. The material properties and the selected geometry

are defined in Sections 3.1 and 3.2.

The in-plane displacement components are restrained at the curved and straight edges, i.e. $u = v = w = 0$. The rotational boundary conditions of the panel are defined in Table 1. The boundary conditions considered are; SSSS: all edges simply supported, CCCC: all edges clamped, CSCS: curved edges clamped-straight edges simply supported, SCSC: curved edges simply supported-straight edges clamped. For the problem under consideration, \mathbf{V}_{3i} is selected as the outward unit normal and the unit vector \mathbf{V}_{1i} is calculated by multiplying \mathbf{V}_{3i} with the unit vector in y direction, \mathbf{e}_2 ; i.e. $\mathbf{V}_{1i} = \mathbf{V}_{3i} \times \mathbf{e}_2$.

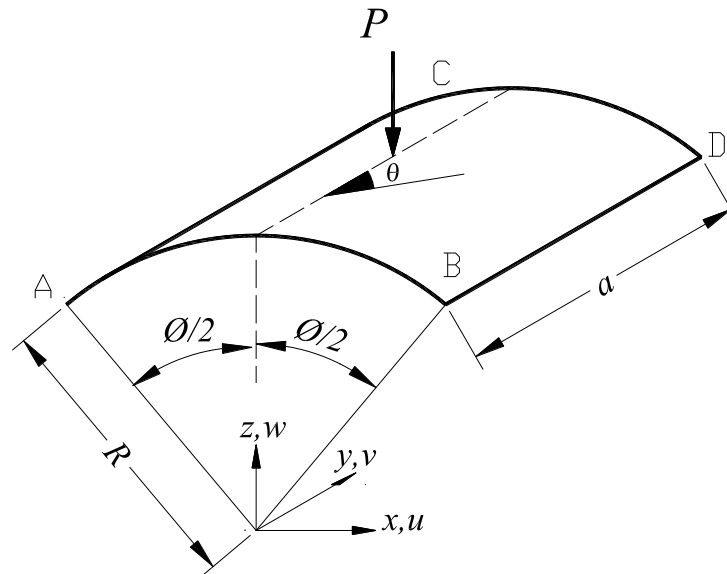


Figure 2. Cylindrical panel subject to a pinching force

Table 1. The rotational boundary conditions considered (1: free, 0: restrained)

Edge	SSSS		CCCC		SCSC		CSCS	
	α	β	α	β	α	β	α	β
curved	AB	0	1	0	0	1	1	0
	CD	0	1	1	0	0	1	0
straight	AC	1	0	1	0	1	1	0
	BD	1	0	0	1	0	1	0

3. NUMERICAL RESULTS AND DISCUSSION

First, two verification problems are solved in this section. Then, for the same geometry and material properties, the influences of the tangential and rotational edge boundary conditions on the nonlinear response are investigated. A total of 16 sample load-displacement values obtained for the boundary conditions considered are presented in Tables 2 and 3 given in the appendix. A 6x6 finite element mesh is found out to yield accurate results and therefore all of the numerical results presented are obtained using the same finite element mesh.

3.1. Verification Problems

Numerical results, obtained here using a 6x6 finite element mesh for a cylindrical panel with $R=2540$ mm, $\varphi=0.2$ rad, $a=508$, are compared with the numerical results presented by Sze (2004). The material properties are taken as $E_{11}=3300$ MPa, $E_{22}=1100$ MPa, $G_{12}=660$ MPa, $\nu_{12}=0.25$ and it is assumed that

$G_{13}=G_{23}=660$ MPa. The curved edges are free and the straight edges are hinged. This boundary condition is named as FSFS, where letters F, and S denote “free”, and “simply supported”.

The numerical results obtained for $t=12.7$ mm and stacking sequence $[90^\circ/0^\circ/90^\circ]$ are presented in Fig. 3(a) and in Fig. 3(b) for $t=6.35$ mm and stacking sequence $[0^\circ/90^\circ/0^\circ]$. It can be observed from Fig.3 that the numerical results obtained for both thickness values are in excellent agreement with the reference results.

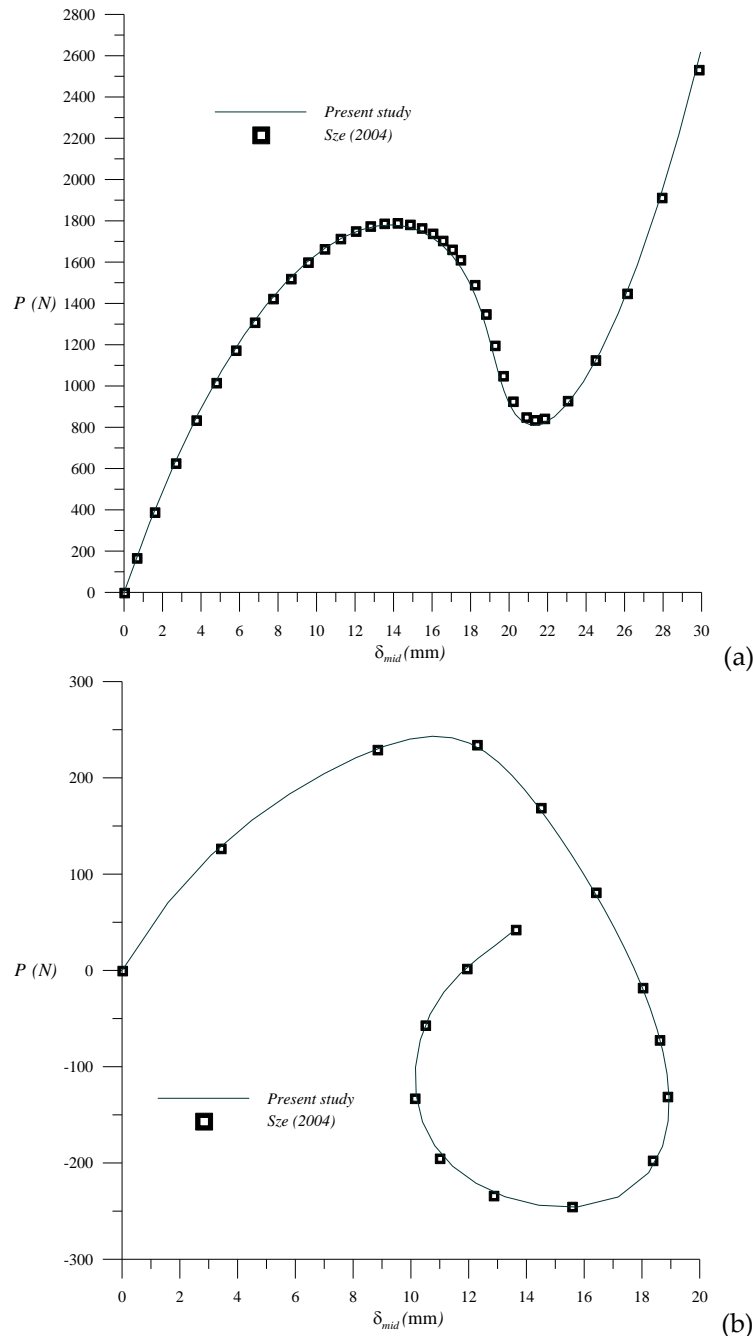


Figure 3. Load-deflection curves for FSFS cylindrical panel subject to a pinching force (a) $t=12.7$ mm $[90^\circ/0^\circ/90^\circ]$ (b) $t=6.35$ mm $[0^\circ/90^\circ/0^\circ]$

3.2. The Influence of Rotational Boundary Conditions

Numerical results are presented in this section for the boundary conditions described in Table 1 and

the geometry, and the material properties given in Section 3.1. The following cases are considered;

Case 1: $t=12.7$ mm, and stacking sequence $[90^\circ/0^\circ/90^\circ]$

Case 2: $t=6.35$ mm, and stacking sequence $[0^\circ/90^\circ/0^\circ]$

The load-displacement curves for the selected cases and for all of the boundary conditions considered are presented in Fig. 4(a) and 4(b). It can be observed from Fig. 4(a) that, for Case 1, all of the boundary conditions other than FSFS B.C. yield a softening-stiffening behavior and CCCC panels are much stiffer than the SSSS panels. As expected, the nonlinear deflections for the SCSC and CSCS panels are in between the CCCC and SSSS panels, respectively. Similar deductions can be reached for $t=6.35$ mm panels by examining Fig. 4(b) the main difference being that the load-displacement behaviour the CSCS panel is almost identical with that of the CCCC panel. Therefore, if the straight edges are clamped, then restraining the curved edges against rotation for $t=6.35$ mm may not be necessary. Similarly, there is no significant difference between the SSSS and SCSC panels for $t=6.35$ mm which implies that clamping the straight edges is not necessary if the curved edges are simply supported.

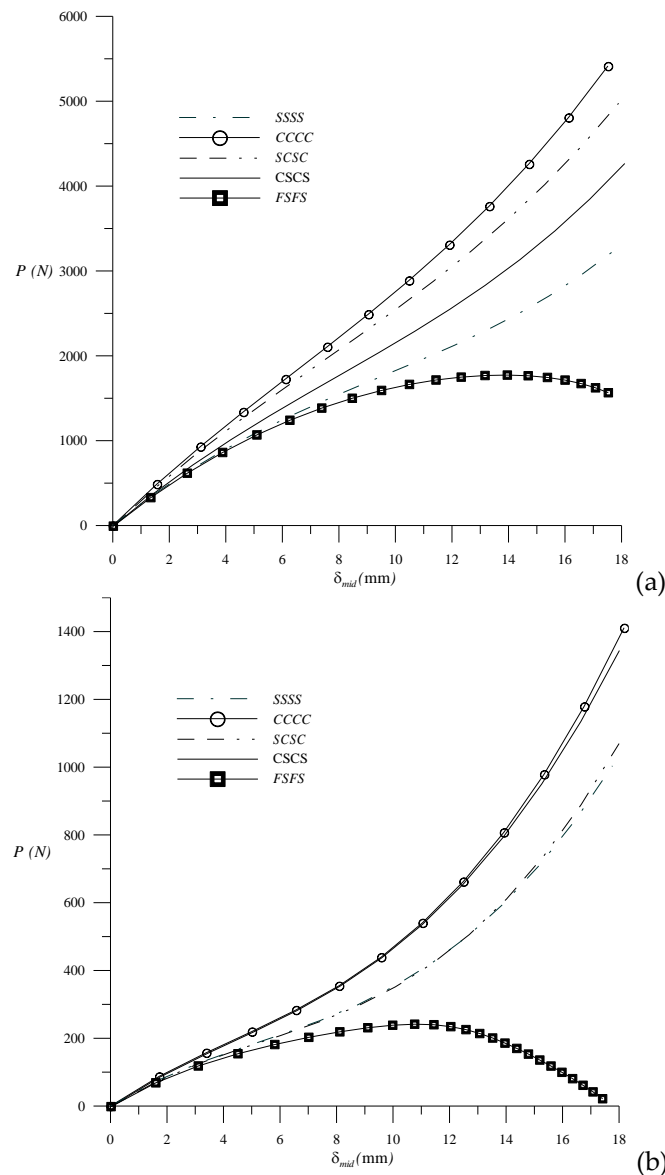


Figure 4. Load-deflection curves for the selected B.C. (a) $t=12.7$ mm $[90^\circ/0^\circ/90^\circ]$ (b) $t=6.35$ mm $[0^\circ/90^\circ/0^\circ]$

3.3. The Influence of Tangential Edge Restraints

It's observed during this study that transforming the related dof (degrees of freedom) corresponding to the corner nodes makes the nonlinear response extremely unstable and no numerical result could be obtained for this case. Similarly, unstable nonlinear response is observed when tangential displacement is set free at both straight sides. Therefore, only one of the straight edges is set free to displace in the tangential direction and no transformation is made at the corners of the panel. The numerical results obtained are presented in Figures 5(a) and 5(b) for the "SSSS*" and "CCCC*" rotational boundary conditions respectively. The superscript "*" means that one of the straight edges of the panel is set free in the tangential direction. Comparison is also made for the FSFS B.C.

It can be observed from Figures 5(a) and 5(b) that, the results obtained for the SSSS* and CCCC* boundary conditions are very close to the results obtained for the SSSS and CCCC boundary conditions. The only difference is that, the tangentially restrained panels are slightly stiffer. Thus, it is shown that if at least one of the edges is tangentially unrestrained, the nonlinear response is stable. It can also be observed from Figures 5(a) and 5(b) that, the SSSS* panels unexpectedly have less initial stiffness comparing with the FSFS panels, which may be due to the fact that the boundary conditions are not symmetrical.

It should also be noted that the arc-length used should be selected carefully when one of the edges is unrestrained in the tangential direction as using high arc length values may cause numerical stability problems.

4. CONCLUSIONS

In this study, the influences of tangential edge restraints and rotational boundary conditions on the nonlinear response of symmetrically laminated perfect cylindrical panels subject to a pinching force are investigated.

A degenerated shell element formulation of which is based on the Total Lagrangian Formulation is used to conduct the required geometrically nonlinear analyses and the arc length method is used to trace the nonlinear path. The sign criterion proposed by Feng *et al.* (1995, 1996) is used and excellent results are obtained for the verification problems solved. It should be mentioned here that a the method is slightly modified here and if the unbalanced loads tend to increase at a certain iteration step, then iterations are stopped to prevent divergence and the unbalanced load vector is added to the internal force vector of the next iteration. This approach may be followed especially if the arc length selected is not suitable.

Then the numerical results obtained are presented. First, the nonlinear shell finite element used is verified for geometrically nonlinear analysis and then numerical results are presented for 4 different sets of rotational boundary conditions and 2 different thickness values. A softening-stiffening stable nonlinear response is observed for all of the considered rotational boundary conditions. The results also show that restraining either one of the curved or straight edges against rotation may yield the same load-displacement behavior for some panel thickness values. This means that, rotational restraints at some of the edges may not be required for some thickness values. The rotational restraint at an edge is proportional to the torsional rigidity of the stiffener and therefore, some of the stiffeners may be eliminated from design or stiffeners having low torsional rigidity may be used for some cases.

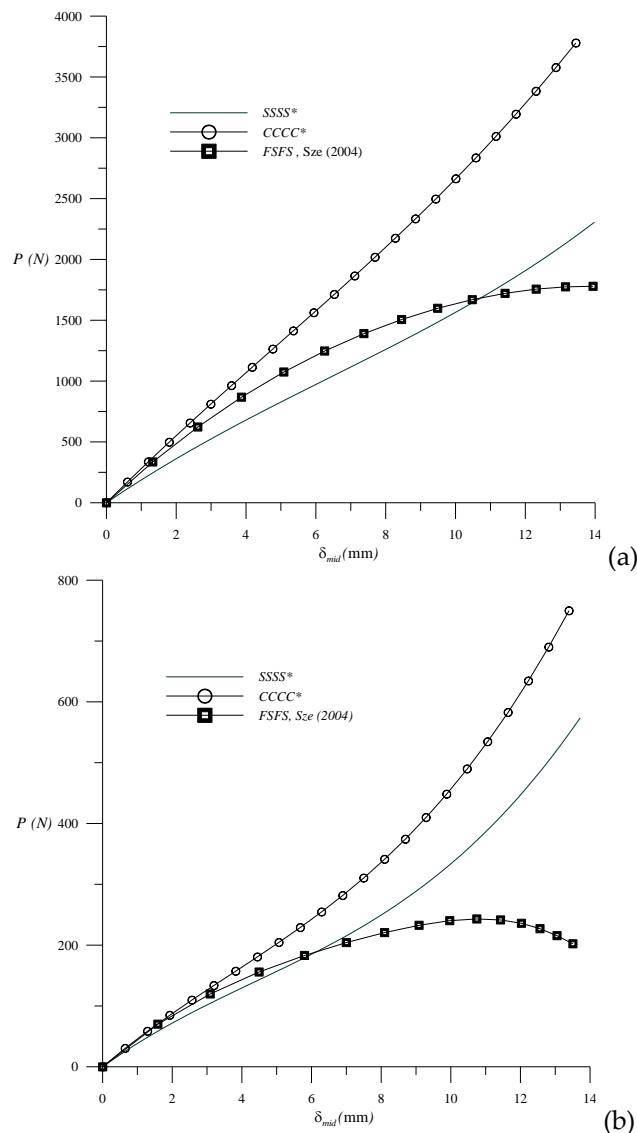


Figure 5. Load-deflection curves for SSSS* and CCCC* boundary conditions
 (a) $t=12.7$ mm $[90^\circ/0^\circ/90^\circ]$ (b) $t=6.35$ mm $[0^\circ/90^\circ/0^\circ]$

Finally, numerical results are presented for simply supported and clamped panels with one straight side tangentially unrestrained. The numerical results presented show that there is no significant difference between the tangentially unrestrained and restrained clamped panels when only one edge is tangentially unrestrained. However, it is observed that the simply supported panels demonstrate a much less stiff behavior when tangential displacements of one of the straight edges are unrestrained. It is also determined that the nonlinear response is unstable when both straight edges are tangentially unrestrained, which may cause catastrophic failure if not taken into account. A simple solution of this problem may be to use stiffeners at the straight edges, which are rigid enough to prevent failure.

Appendix

Table 2. The P (N)- δ_{mid} (mm) values obtained for Case I ($t=12.7$ mm, $[90^\circ/0^\circ/90^\circ]$)

SSSS		CCCC		SCSC		CSCS		SSSS*		CCCC*	
δ_{mid}	P	δ_{mid}	P	δ_{mid}	P	δ_{mid}	P	δ_{mid}	P	δ_{mid}	P
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0,00	0,00	0.00	0.00
1.33	339.04	1.56	489.12	1.50	456.79	1.42	382.47	0,48	92,47	0.60	170.69
2.64	631.19	3.10	930.76	2.98	864.56	2.81	719.44	1,45	266,57	1.20	336.42
3.91	884.29	4.62	1339.01	4.43	1235.05	4.17	1020.80	2,40	428,11	1.80	497.87
5.14	1105.64	6.11	1727.07	5.85	1579.20	5.51	1295.75	3,35	579,38	2.40	655.69
6.36	1302.05	7.59	2107.22	7.25	1907.13	6.82	1552.86	4,29	722,64	3.58	963.05
7.54	1479.92	9.04	2490.84	8.63	2228.27	8.12	1800.14	5,22	860,12	4.18	1113.88
8.70	1645.32	10.48	2888.50	9.98	2551.41	9.40	2045.09	6,15	994,07	5.36	1413.04
9.85	1804.17	11.91	3310.06	11.32	2884.89	10.66	2294.88	7,08	1126,70	5.94	1562.60
10.98	1962.25	13.32	3764.79	12.65	3236.72	11.91	2556.38	8,92	1396,94	7.11	1864.69
12.09	2125.35	14.72	4261.51	13.96	3614.68	13.15	2836.31	9,84	1539,04	7.69	2018.38
13.21	2299.31	16.12	4808.69	15.27	4026.46	14.39	3141.30	10,76	1688,81	8.85	2333.86
14.32	2490.08	17.52	5414.51	16.57	4479.68	15.62	3477.99	11,68	1848,55	9.43	2496.73
15.43	2703.79	18.91	6086.95	17.87	4981.99	16.86	3853.05	12,60	2020,57	10.59	2835.33
16.55	2946.76	20.30	6833.83	19.18	5541.07	18.09	4273.23	13,52	2207,22	11.16	3012.07
17.68	3225.49	21.70	7662.88	20.49	6164.63	19.34	4745.41	14,45	2410,86	12.31	3382.79
18.82	3546.72	23.09	8581.70	21.80	6860.46	20.59	5276.58	16,32	2878,66	12.88	3577.70

Table 3. The P (N)- δ_{mid} (mm) values obtained for Case II ($t=6.35$ mm, $[0^\circ/90^\circ/0^\circ]$)

SSSS		CCCC		SCSC		CSCS		SSSS*		CCCC*	
δ_{mid}	P	δ_{mid}	P	δ_{mid}	P	δ_{mid}	P	δ_{mid}	P	δ_{mid}	P
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.61	73.44	1.72	87.45	1.60	73.51	1.73	87.29	0,28	11,48	0,65	30,37
3.15	127.63	3.39	157.33	3.14	127.95	3.40	156.87	0,57	22,45	1,29	58,47
4.63	171.13	5.00	219.85	4.61	171.35	5.02	219.46	1,69	61,99	2,57	109,67
6.04	210.85	6.57	283.52	6.02	210.50	6.58	283.50	2,80	96,09	3,20	133,67
7.41	252.01	8.09	354.95	7.40	250.93	8.10	355.18	3,90	126,89	4,45	180,66
8.75	298.60	9.58	439.29	8.74	297.19	9.58	438.94	4,99	156,48	5,06	204,48
10.06	353.85	11.04	540.64	10.06	353.17	11.03	538.12	6,06	186,80	6,29	254,63
11.35	420.51	12.49	662.41	11.37	422.33	12.45	655.35	7,13	219,65	6,90	281,65
12.64	501.01	13.92	807.63	12.68	507.81	13.86	792.84	8,19	256,64	8,10	341,19
13.92	597.55	15.35	979.07	13.99	612.62	15.25	952.55	9,25	299,24	8,70	374,27
15.20	712.21	16.76	1179.38	15.31	739.62	16.62	1136.28	10,31	348,82	9,88	448,32
16.48	846.97	18.18	1411.16	16.64	891.60	17.99	1345.82	11,36	406,69	10,47	489,78
17.76	1003.77	19.59	1677.02	17.98	1071.33	19.35	1583.01	12,40	474,11	11,64	582,65
19.05	1184.56	21.00	1979.63	19.32	1281.60	20.70	1849.79	13,45	552,33	12,23	634,47
20.33	1391.42	22.41	2321.76	20.68	1525.22	22.05	2148.37	14,51	642,59	13,40	749,83
21.62	1626.60	23.82	2706.29	22.04	1805.11	23.39	2481.27	15,56	746,13	13,98	813,74

REFERENCES

- Almroth, B. O. (1966). Influence of edge conditions on the stability of axially compressed cylindrical shells. *AIAA Journal*, 4(1), 134-140.
- Bakshi, K., & Chakravorty, D. (2014). Geometrically linear and nonlinear first-ply failure loads of composite cylindrical shells. *Journal of Engineering Mechanics*, 140(12), 04014094.
- Barbosa, J. A. T., & Ferreira, A. J. M. (2009). Geometrically nonlinear analysis of functionally graded plates and shells. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 17(1), 40-48.
- Bathe, K. J., & Bolourchi, S. (1979). Large displacement analysis of three-dimensional beam structures. *International journal for numerical methods in engineering*, 14(7), 961-986.
- Bathe, K. J., & Bolourchi, S. (1980). A geometric and material nonlinear plate and shell element. *Computers & structures*, 11(1-2), 23-48.
- Bergan, P. G., Horrigmoe, G., Bråkeland, B., & Søreide, T. H. (1978). Solution techniques for non-linear finite element problems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 12(11), 1677-1696.
- Cagdas, I. U., & Adali, S. (2012-b). Effect of Fiber Orientation on Buckling and First-Ply Failures of Cylindrical Shear-Deformable Laminates. *Journal of Engineering Mechanics*, 139(8), 967-978.
- Cagdas, I., & Adali, S. (2012-a). Design of a laminated composite variable curvature panel under uniaxial compression. *Engineering Computations: International Journal for Computer-Aided Engineering and Software*, 29(1), 48-64.
- Chao, W. C., & Reddy, J. N. (1984). Analysis of laminated composite shells using a degenerated 3-D element. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 20(11), 1991-2007.
- Crisfield, M. A. (1981). A fast incremental/iterative solution procedure that handles "snap-through". In *Computational Methods in Nonlinear Structural and Solid Mechanics* (pp. 55-62). Pergamon.
- de Souza Neto, E. A., Peric, D., & Owen, D. R. (2011). *Computational methods for plasticity: theory and applications*. John Wiley & Sons.
- Hieu, P. T., & Tung, H. V. (2019). Thermal buckling and postbuckling of CNT-reinforced composite cylindrical shell surrounded by an elastic medium with tangentially restrained edges. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 0892705719853611.
- Kant, T. (1992). A general fibre-reinforced composite shell element based on a refined shear deformation theory. *Computers & Structures*, 42(3), 381-388.
- Librescu, L., & Lin, W. (1997). Vibration of thermomechanically loaded flat and curved panels taking into account geometric imperfections and tangential edge restraints. *International journal of solids and structures*, 34(17), 2161-2181.
- Panda, S. K., & Singh, B. N. (2009). Thermal post-buckling behaviour of laminated composite cylindrical/hyperboloid shallow shell panel using nonlinear finite element method. *Composite Structures*, 91(3), 366-374.
- Pawsey, S. F., & Clough, R. W. (1971). Improved numerical integration of thick shell finite elements. *International journal for numerical methods in engineering*, 3(4), 575-586.
- Ram, K. S., & Babu, T. S. (2002). Buckling of laminated composite shells under transverse load. *Composite structures*, 55(2), 157-168.
- Singha, M. K., Ramachandra, L. S., & Bandyopadhyay, J. N. (2006). Nonlinear response of laminated cylindrical shell panels subjected to thermomechanical loads. *Journal of engineering mechanics*, 132(10), 1088-1095.
- Sit, M., & Ray, C. (2019). A third order nonlinear model to study the dynamic behaviour of composite laminated structures under thermal effect with experimental verification. *Composite Structures*, 212, 106-117.
- Sze, K. Y., Liu, X. H., & Lo, S. H. (2004). Popular benchmark problems for geometric nonlinear analysis of shells. *Finite elements in analysis and design*, 40(11), 1551-1569.

- Trang, L. T. N., & Van Tung, H. (2018). Nonlinear stability of CNT-reinforced composite cylindrical panels with elastically restrained straight edges under combined thermomechanical loading conditions. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 0892705718805134.
- Van Tung, H. (2013). Postbuckling behavior of functionally graded cylindrical panels with tangential edge constraints and resting on elastic foundations. *Composite Structures*, 100, 532-541.
- Zhou, Y., Stanciulescu, I., Eason, T., & Spottswood, M. (2015). Nonlinear elastic buckling and postbuckling analysis of cylindrical panels. *Finite Elements in Analysis and Design*, 96, 41-50.



FARKLI EĞİM AÇILARINDA GÜNEŞ KOLLEKTÖRLERİNİN ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ: ERZİNCAN İLİ ÖRNEĞİ

¹Muhammet Yasin KABA , ²Aslıhan KURNUÇ SEYHAN , ³Pınar CELEN , ⁴Ali CELEN 

^{1,2,4}Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Erzincan,
TÜRKİYE

³Gümüşhane Üniversitesi/Gümüşhane Meslek Yüksekokulu/Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Gümüşhane,
TÜRKİYE

¹mykaba@yahoo.com, ²akurnuc@erzincan.edu.tr, ³[pinarcelen@gumushane.edu.tr](mailto:pincarcelen@gumushane.edu.tr),
⁴alicelen@erzincan.edu.tr

(Geliş/Received: 03.04.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 05.07.2022)

ÖZ: Güneş kolektörleri kullanım suyu ısıtma uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Tasarım aşamasında güneş kolektörlerinin en uygun eğim açısında konumlandırılması güneş enerjisinden verimli faydalanılması için önemlidir. Bu çalışmada, Erzincan ilinde konumlandırılan bir güneş kolektörünün eğim açısının aylık/günlük ortalama ışınım değerlerine, su çıkış sıcaklığına, enerji ve ekserji verimlerine etkisi teorik olarak incelenmiştir. Optimum güneş kolektörü eğim açısının en yüksek ve en düşük değerlerinin Aralık ve Haziran aylarında sırasıyla 63° ve 0° olduğu görülmüştür. Erzincan için önerilen (27.14°) ve hesaplanan eğim açıları için günlük ortalama saatlik ışınım değerleri karşılaştırılmış olup en büyük değişimin Ocak ayında %26 olduğu görülmüştür. Buna ek olarak güneş kolektörünün enerji ve ekserji verimleri hesaplanmış olup optimum eğim açıları için en yüksek verimleri sırasıyla %74.2 ve %9.7 olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Güneş kolektörü, Optimum eğim açısı, Enerji Analizi, Ekserji Analizi

Energy and Exergy Analysis of Solar Collectors Having Different Tilt Angles: Case Study of Erzincan City

ABSTRACT: Solar collectors are frequently used in domestic water heating applications. In the design stage, the positioning of solar collector with suitable title angle is important in order to utilize from sun energy efficiently. In this study, the effect of tilt angle of a solar collector located to Erzincan city on monthly/daily average radiation values, water outlet temperature, energy and exergy efficiencies are theoretically investigated. It is seen that the maximum and minimum values of optimum tilt angles are 63° ve 0° for December and June, respectively. Tilt angles which are suggested for Erzincan (27.14°) and calculated are compared for daily average hourly radiation values and it is seen that the maximum variation is 26% for January. In addition, energy and exergy efficiencies of solar collector are estimated and the maximum efficiencies are determined as 74.2% ve 9.7% for optimum tilt angles.

Keywords: Solar collector, Optimum tilt angle, Energy analysis, Exergy analysis

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Güneş enerjisi kullanımı, sürdürülebilirliği sağlamak ve konvansiyonel enerji kaynaklarının kullanımını azaltmak için hayati önem taşımaktadır. Güneş enerjisi, tüm yenilenebilir enerji kaynakları arasında en büyük potansiyele sahiptir ve bu yenilenebilir enerji kaynağının küçük bir miktarı bile

dünyanın toplam enerji talebini karşılamak için yeterlidir. Bu enerjinin %5'i kullanılabilirse, dünyanın enerji ihtiyacının 50 katı karşılanmış olacaktır (Kumar ve diğ., 2012; Kumar ve Kim, 2016; Kumar ve Kim, 2017). Türkiye bulunduğu coğrafi konum itibarıyla yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına (GEPA) göre, ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2741.07 saat olup ortalama yıllık toplam ışınlama değeri 1527.46 kWh/m² olarak hesaplanmıştır. Aralık 2020 sonu itibarıyla güneş enerjisine dayalı elektrik kurulu güç 6.667 MW olup, toplam elektrik üretimi içerisindeki güneş enerjisi payı ise %3.6'dır (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022a; T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022b).

Güneş enerjisinden, güneş kolektörleri kullanılarak ısıtmada yararlanılabilir, binalar veya endüstriyel gereksinimler için uygun maliyetli bir şekilde sıcak su üretilebilir (Feliński ve Sekret, 2017; Sokhansefat ve diğ., 2018). Güneş enerjisinin kullanıldığı güneş kolektörlerin enerji ve ekserji analizine ait literatürdeki bazı çalışmalar şöyle özetlenmiştir:

Ge ve diğ. (2014), düz plakalı kolektörler için ortam sıcaklığı, güneş ışınlama, akışkan giriş sıcaklığı ve akışkan kütleli debisinin faydalı ısı, faydalı ekserji ve ekserji kayıp hızları üzerindeki etkilerini incelemiştir. Maksimum faydalı ekserji hızını elde etmek için hesaplanan optimal akışkan giriş sıcaklığı 69°C'dir ve maksimum faydalı ekserji 101.6 W'dır. Ortam sıcaklığı 20°C, güneş radyasyonu 800 W/m², akışkan kütleli debisi 0.05 kg/s ve akışkan giriş sıcaklığı 50°C'ye ayarlanarak ekserji analizi gerçekleştirilmiştir. Ekserji verimi %5.96 olarak hesaplanmış ve toplam ekserjinin %72.86'sını oluşturan en büyük ekserji kaybının, soğurucu plaka yüzeyi ile güneş arasındaki sıcaklık farkından kaynaklandığı belirlenmiştir.

Moosavian ve diğ. (2021), her biri farklı bir iklimin temsilcisi olarak İran'ın 5 şehrini (Rasht, Şiraz, Tahran, Abadan ve Sanandaj) seçmiş ve bu şehirlerin her birinde parabolik güneş kolektörünün enerji, ekserji, ekonomik ve çevresel açıdan performansını belirlemiştir. Yapılan çalışma sonucunda, Akdeniz iklimine sahip olan Şiraz şehrindeki parabolik güneş kolektörlerinin %71.97 ile diğer şehirlere göre en yüksek termal enerji verimliliğine sahip olduğu görülmüştür. Öte yandan, ekserji analizine bakıldığında nemli kıta iklimine sahip Sanandaj şehri, %22 ile en yüksek ekserji verimliliğine sahip il olarak ön plana çıkmaktadır. Enerji bazlı çevresel ekonomik analiz göz önünde bulundurulduğunda ise 0.75 \$/günCO₂ maliyeti ile güneş kolektörü için en uygun iklim olarak nemli bir subtropikal iklime sahip Rasht şehri belirlenmiştir. Ekserjiye dayalı çevresel ekonomik analiz sayesinde, yine Rasht şehri 0.16 \$/günCO₂ maliyeti ile güneş kolektörü için en uygun çevresel iklim olarak seçilmiştir.

Çalışkan (2017), güneş kolektörünün enerji, ekserji, çevre, çevre ekonomik, eksergoçevresel, eksergoçevresel ekonomik analizlerini yapmıştır. Çalışmada, kolektörün enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %25.40 ve %0.732 olarak hesaplanmıştır. Eksergoçevresel sonucu (0.0727 kg CO₂/gün), çevresel sonuçtan (0.0777 kg CO₂/gün) daha düşük iken çevresel ekonomik sonuç (0.00112 \$/gün), eksergoçevresel ekonomik sonucundan (0.00105 \$/gün) daha yüksektir. Çalışmanın sonucu olarak, güneş kolektör sistemlerinin ekserji ve ekonomi tabanlı eksergoçevresel ve eksergoçevresel ekonomik yöntemleri kullanılarak daha etkin bir şekilde değerlendirilebileceği ifade edilmiştir.

Lakhdar ve diğ. (2019), Cezayir'in Sahra bölgesinde yer alan Adrar koşullarında termosifonlu bir düz plakalı güneş kolektörün ekserji yıkımını en aza indiren hem ekserjiyi hem de enerji verimliliğini en üst düzeye çıkararak optimal çalışma parametrelerini elde etmek için ekserjetik analizini yapmışlardır. Düz plakalı güneş kolektörü 27° eğimle güneye yönlendirilmiştir. 7 Nisan 2005 tarihinde ölçülen sıcaklık ve güneş ışınlama değerleri ile boyutsuz sıcaklıklar ilişkilerin bir fonksiyonu olarak MATLAB yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Hem ölçülen hem de hesaplanan değerler karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, optimal ekserji verimliliğinin %8.28 ve optimal kütle akış hızının 0.06 kg/s olduğunu ortaya koymuştur.

Jafarkazemi ve Ahmadifard (2013), akışkan debisi ve sıcaklığı, çalışma akışkanı tipi ve arka yalıtım kalınlığı gibi tasarım parametrelerinin kolektörün enerji ve ekserji verimliliğine etkisini deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Düz plakalı güneş kolektörü İran'ın Tahran şehrinde bulunan İslami Azad Üniversitesi güneş enerjisi araştırma merkezinde açık bir alanda 40° eğimle güneye yönlendirilmiştir. Sonuçların analizi ve karşılaştırılması ile giriş suyu sıcaklığının ortam sıcaklığından 40°C daha fazla ve giriş suyu debisinin düşük olması durumunda sistemin genel performansının arttığını belirlemiştir.

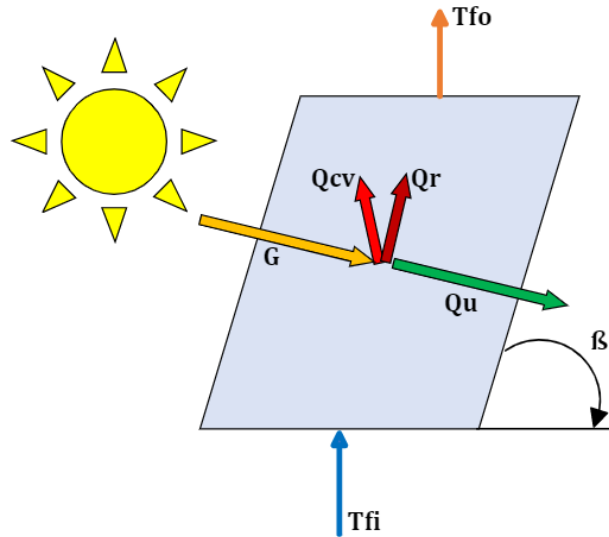
Ayrıca 5 cm'den daha kalın bir arka yalıtım kullanılmasının, kolektörün enerji ve ekserji verimliliği üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını ifade etmişlerdir. Teorik sonuçlara göre, düz plakalı güneş kolektörünün maksimum enerji ve ekserji verimliliğini sırasıyla yaklaşık %80 ve %8 olarak hesaplamışlardır.

Kouhikamali ve Hassani (2014), İran'ın kuzey kesimlerinde yüksek nem nedeniyle, dağınık radyasyon, doğrudan radyasyondan daha önemli bir rol oynadığını ve kolektörün en iyi eğim açısının değiştiğini ifade etmişler ve Rasht şehrinde düz plakalı güneş kolektörünün kullanımını araştırmışlardır. Rasht'ta her ay için en iyi eğim açıları hesaplanmış ve değerler Zahedan ve Birjand şehirleri ile karşılaştırmışlardır. Farklı uygulamalarda kolektör uzunluğunu belirlemek için İran'da üretilen tipik kolektör özelliklerini kullanmışlardır. Yatay kolektöre göre eğim açısının değiştirilmesi ile günlük, aylık, mevsimsel ve yıllık olarak verilen güneş enerjisinin sırasıyla %16.58, %15.84, %15.31 ve %10.79 oranında arttığını belirterek birkaç kolektör için eğim açısının mevsimsel olarak değiştirilmesini önermektedirler. Düşünülen düz plakalı kolektörde su sıcaklığının Aralık ve Eylül aylarında sırasıyla 60°C ve 85°C'ye çıktığını hesaplamışlardır. 10 adet seri kolektörden oluşan sistemde verimlerin birinci ve son kolektörde sırasıyla yaklaşık olarak %60'tan fazla ve %10'dan az olduğunu belirtmişlerdir.

Bu çalışmada, Erzincan ilinde konumlandırılan ve ısıtma amaçlı kullanılan bir güneş kolektörünün eğim açısının performansı teorik olarak araştırılmıştır. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden temin edilen veriler kullanılarak hesaplama yönteminin geçerliliği test edilmiş olup, eğim açısının (0-90°) ortalama ışıma değerleri üzerine etkisi yılın her ayı için incelenmiştir. Yılın her ayı için belirlenen optimum ve önerilen eğim açıları kullanılarak su giriş debisinin (0.01-0.03 kg/s) su çıkış sıcaklığına etkisi belirlenmiştir. Bunlara ek olarak, yılın her ayında güneş kolektörünün optimum ve önerilen eğim açıları için enerji ve ekserji verimi değerleri hesaplanmıştır.

HESAPLAMA YÖNTEMİ (CALCULATION METHOD)

Güneş kolektörlerinin tasarımında güneşten gelen ışımdan ne kadar yararlandığı ve buna bağlı olarak sistemin veriminin belirlenmesi önemlidir. Güneş kolektörlerinde enerji ve ekserji analizleri yapabilmek için Şekil 1'de verilen güneş kolektörü ve Çizelge 1'de verilen sabit veriler göz önüne alınmıştır.



Şekil 1. Güneş kolektörünün şematik gösterimi

Figure 1. The schematic representation of solar collector

Güneş kolektörlerinde enerji ve ekserji analizleri yapabilmek için ilk önce analiz yapılmak istenen yüzeye gelen güneş ışıması miktarı hesaplanır. Yüzeye gelen toplam güneş ışıması miktarı yüzeye direkt

gelen, gökyüzünden yansıyan ve yeryüzünden yansıyan ışınımı enerjisinden oluşmakta olup şu şekilde hesaplanır (Ge ve diğ., 2014; Duffie ve diğ. 2020):

$$I_T = \overbrace{I_b * R_b}^{\text{Yüzeyle direkt gelen}} + \overbrace{I_d * \left[\frac{1 + \cos \beta}{2} \right]}^{\text{Gökyüzünden yansıyan}} + \overbrace{I * \rho_g * \left[\frac{1 - \cos \beta}{2} \right]}^{\text{Yeryüzünden yansıyan}} \quad (1)$$

Burada yüzeyle direkt gelen, gökyüzünden yansıyan ve yeryüzünden yansıyan güneş ışınımı enerjisi şu şekilde hesaplanır:

$$I_b = I * \left[1 - \frac{I_d}{I} \right] \quad (2)$$

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1 - 0.249 * k_T & 0 \leq k_T \leq 0.35 \\ 1.557 - 1.84 * k_T & 0.35 \leq k_T \leq 0.75 \\ 0.177 & k_T > 0.75 \end{cases} \quad (3)$$

$$I = I_0 * k_T \quad (4)$$

Yüzeyle direkt gelen güneş ışınımı miktarının hesaplanmasında kullanılan iki saat arasındaki ortalama geometrik faktör şu şekilde hesaplanır:

$$R_{b,ort} = \frac{a}{b} \quad (5)$$

Burada kullanılan a ve b değerleri şu şekilde hesaplanır:

$$a = (\sin \delta * \sin \varphi * \cos \beta - \sin \delta * \cos \varphi * \sin \beta * \cos \gamma) * \frac{1}{180} * (\omega_2 - \omega_1) * \pi + (\cos \delta * \cos \varphi * \cos \beta + \cos \delta * \sin \varphi * \sin \beta * \cos \gamma) * (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) - (\cos \delta * \sin \beta * \sin \gamma) * (\cos \omega_2 - \cos \omega_1) \quad (6)$$

$$b = (\cos \varphi * \cos \delta) * (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + (\sin \varphi * \sin \delta) * \frac{1}{180} * (\omega_2 - \omega_1) * \pi \quad (7)$$

Yüzeyle direkt gelen güneş ışınımı miktarının hesaplanmasında aylık geometrik faktör şu şekilde hesaplanır:

$$\overline{R_b} = \frac{\cos(\varphi - \beta) * \cos \delta * \sin \omega' + (\pi/180) * \omega' * \sin(\varphi - \beta) * \sin \delta}{\cos \varphi * \cos \delta * \omega + (\pi/180) * \omega * \sin \varphi * \sin \delta} \quad (8)$$

Burada kullanılan ω' değeri şu şekilde hesaplanır:

$$\omega' = \min \left[\cos^{-1}(-\tan \varphi * \tan \delta), \cos^{-1}(-\tan(\varphi - \beta) * \tan \delta) \right] \quad (9)$$

Güneş ışınımı enerjisi aylık ortalama günlük ışınım ve günlük ortalama saatlik ışınım olmak üzere iki farklı denklemlerle hesaplanmakta olup bu denklemler şu şekildedir:

$$I_0 = \frac{24 * 3600 * I_{gs}}{\pi} * \left[1 + 0.33 * \cos \left(\frac{360 * n}{365} \right) \right] * \left[\cos \delta * \cos \varphi * \sin \omega + \frac{\pi * \omega * \sin \delta * \sin \varphi}{180} \right] \quad (10)$$

$$I_0 = \frac{12 \cdot 3600 \cdot I_{gs}}{\pi} * \left[1 + 0.33 * \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right) \right] * \left[\frac{\cos \delta * \cos \varphi * (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \pi * (\omega_2 - \omega_1) * \sin \delta \sin \varphi}{180} \right] \quad (11)$$

Güneş ışınımı enerjisini hesaplamak için kullanılan deklinasyon açısı, saat açısı ve herhangi bir andaki saat açısı denklemleri şu şekildedir:

$$\delta = 23.45 * \sin\left[\frac{360}{365} * (284 + n)\right] \quad (12)$$

$$\omega = \cos^{-1}[-\tan \varphi * \tan \delta] \quad (13)$$

$$\omega_{1,2} = 15 * (\text{saat} - 12) \quad (14)$$

Güneş enerjisinden elde edebileceğimiz toplam kullanılabilir enerjisi miktarı şu denklemler yardımı ile hesaplanabilir:

$$\dot{Q}_u = G - \dot{Q}_r - \dot{Q}_{cv} \quad (15)$$

$$\dot{Q}_u = \dot{m} * c_p * (T_{fo} - T_{fi}) \quad (16)$$

Güneş enerjisinden kaybedilen enerji miktarı şu şekilde hesaplanır:

$$E\dot{n}_k = \dot{Q}_r + \dot{Q}_{cv} \quad (17)$$

Enerji verimi de yüzde cinsinden şu şekilde hesaplanır:

$$\eta_i = \frac{\dot{Q}_u}{G} * 100 \quad (18)$$

Burada kullanılan kullanılabilir güneş enerjisi miktarı, ışınum ve taşınım enerji kayıpları ise şu şekilde hesaplanır:

$$G = \alpha * I_T * A \quad (19)$$

$$\dot{Q}_r = A * h_r * (T_g - T_a) \quad (20)$$

$$\dot{Q}_{cv} = A * h_{cv} * (T_g - T_a) \quad (21)$$

Işınım ve taşınım enerji kayıplarının belirlenmesinde yardımcı olan ısı transferi katsayıları ise şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$h_r = \frac{[\epsilon * \sigma * (T_g^2 + T_{sky}^2) * (T_g + T_{sky})] * (T_g - T_{sky})}{(T_g - T_a)} \quad (22)$$

$$h_{cv} = 5.7 + 3.8 * V \quad (23)$$

Kollektöre gelen güneş ışınım ekserjisi, kollektöre giren suyun ve kollektörden çıkan suyun ekserjisi şu şekilde hesaplanır:

$$\dot{E}x_{\text{sun}} = G * \left[1 + \frac{1}{3} * \left(\frac{T_0}{T_{\text{sun}}} \right)^4 - \frac{4}{3} * \frac{T_0}{T_{\text{sun}}} \right] \quad (24)$$

$$\dot{E}x_{\text{fi}} = \dot{m} * c_p * \left[T_{\text{fi}} - T_0 - T_0 * \ln \left(\frac{T_{\text{fi}}}{T_0} \right) \right] \quad (25)$$

$$\dot{E}x_{\text{fo}} = \dot{m} * c_p * \left[T_{\text{fo}} - T_0 - T_0 * \ln \left(\frac{T_{\text{fo}}}{T_0} \right) \right] \quad (26)$$

Ekserji verimi yüzde cinsinden şu şekilde hesaplanır:

$$\eta_{ii} = \left[\frac{\dot{E}x_{\text{fo}} - \dot{E}x_{\text{fi}}}{\dot{E}x_{\text{sun}}} \right] * 100 \quad (27)$$

Güneş kolektörünün toplam ekserji kaybı şu şekilde hesaplanır:

$$\dot{E}x_k = \dot{E}x_r + \dot{E}x_{\text{cv}} \quad (28)$$

Burada ışıınım ve taşınım ekserjisi ise şu şekilde hesaplanır:

$$\dot{E}x_r = \dot{Q}_r * \left[1 - \frac{T_0}{T_{\text{sis}}} \right] \quad (29)$$

$$\dot{E}x_{\text{cv}} = \dot{Q}_{\text{cv}} * \left[1 - \frac{T_0}{T_{\text{sis}}} \right] \quad (30)$$

İşınım ve taşınım ekserji hesaplamalarında kullanılan ortalama kolektör sıcaklığı şu şekilde hesaplanır:

$$T_{\text{sis}} = \frac{T_a + T_g}{2} \quad (31)$$

Sistemin ekserji yıkımı şu şekilde hesaplanır:

$$\dot{E}x_d = \dot{E}x_{\text{fi}} + \dot{E}x_{\text{sun}} - \dot{E}x_{\text{fo}} - \dot{E}x_k \quad (32)$$

Sistemin toplam entropi üretimi ise şu şekilde hesaplanır:

$$\dot{S}_{\text{gen}} = \frac{\dot{E}x_d}{T_0} \quad (33)$$

BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

Çizelge 1'deki kabuller, Çizelge 2'deki gün sayısı, güneş doğuş saati, güneş batış saati ve bulutsuzluk oranı değerleri ve Denklem (1)-(14) kullanılarak Erzincan ilindeki bir güneş kolektörünün yüzeyine gelen toplam ışıınım değerleri farklı aylar için hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Meteoroloji Genel Müdürlüğü Erzincan Meteoroloji İstasyonu'ndan temin edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Meteoroloji İstasyonu'ndan temin edilen rüzgar hızı, hava sıcaklığı ve ışıınım değerleri 2010 yılı için elde edilmiş olup, bu değerlerin yıllara göre ciddi oranda değişmediği göz önüne alınmıştır. Bu karşılaştırma hesaplamalar için doğrulama niteliğinde olup sonuçların büyük çoğunluğunun $\pm\%10$ hata bandı aralığında kaldığı Şekil 2'de görülmüştür.

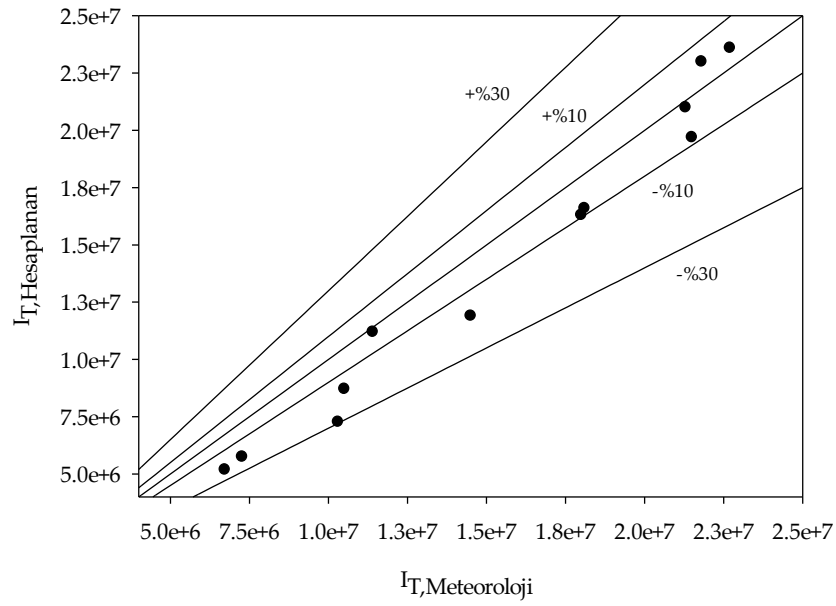
Çizelge 1. Hesaplamalarda kullanılan kabuller*Table 1. Assumptions used in the calculations*

Parametre	Değeri
Boltzman sabiti (σ)	$5.6704 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$
Enlem açısı (φ)	39.75°
Güneş sabiti (I_{gs})	1367 W/m^2
Güneş sıcaklığı (T_{sun})	5778 K
Kollektör yüzey alanı (A)	8 m^2
Kollektör yüzeyi geçirgenliği (α)	0.92
Kollektör yüzeyi yayıcılığı (ϵ)	0.92
Ölü hâl sıcaklığı (T_0)	273.15 K
Özgül ısı (C_p)	4186 J/kgK
Yeryüzü yansıtma katsayısı (ρ_g)	0.20

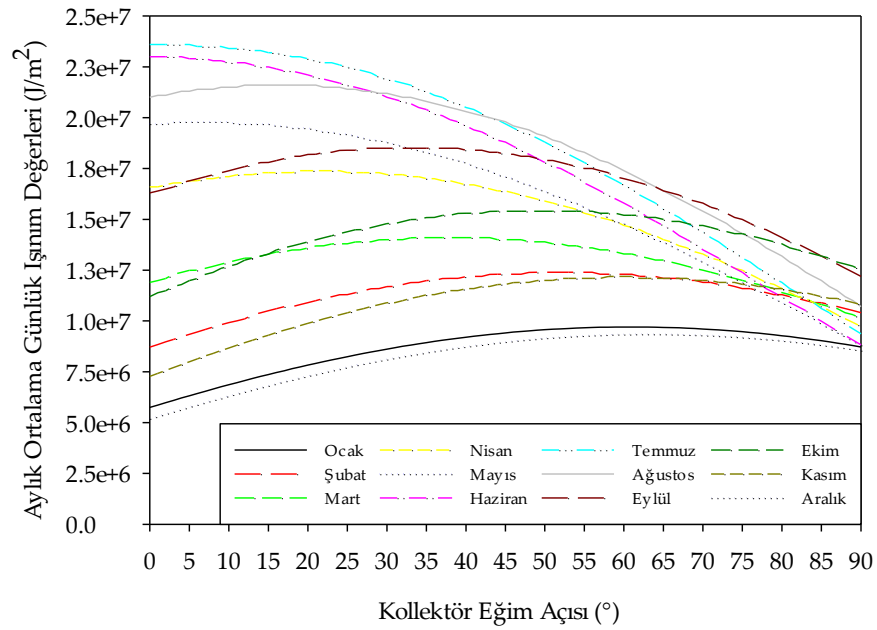
Çizelge 2. Erzincan iline ait veriler*Table 2. Data belonging to Erzincan city*

Aylar	Gün Sayısı (Klein, 1977)	Güneş Doğuş Saati (Duffie ve diğ., 2020)	Güneş Batış Saati (Duffie ve diğ., 2020)	Şebeke Suyu Sıcaklığı (K) (Ceylan, 2010)	Rüzgâr Hızı (m/s) (Erzincan Meteoroloji İstasyonu)	Hava Sıcaklığı (K) (Erzincan Meteoroloji İstasyonu)	Bulutsuzluk Oranı (Duffie ve diğ., 2020)	İşınım Değerleri (J/m ²) (Erzincan Meteoroloji İstasyonu)
Ocak	17	6:37	16:27	279.65	1.11	274.95	0.3741	7267608
Şubat	47	6:10	17:03	278.25	1.36	277.71	0.4211	10543680
Mart	75	5:28	17:34	279.25	1.33	281.61	0.4334	14535216
Nisan	105	4:41	18:04	282.55	1.37	284.28	0.4768	18125088
Mayıs	135	4:04	18:33	286.45	1.15	289.40	0.4959	21497392
Haziran	162	3:50	18:54	290.35	1.29	295.56	0.5512	21802824
Temmuz	198	4:04	18:52	293.75	1.25	298.89	0.5788	22660544
Ağustos	228	4:31	18:21	295.65	1.18	299.67	0.5736	21288192
Eylül	258	4:59	17:34	294.85	0.98	295.47	0.5403	17953544
Ekim	288	5:28	16:47	291.55	0.84	286.36	0.495	11434872
Kasım	318	6:02	16:11	286.85	0.55	280.45	0.4381	10313560
Aralık	344	6:28	16:02	282.35	1.29	277.12	0.373	6723688

Şekil 3'te kollektör eğim açısındaki değişimin aylık ortalama günlük işınım değerleri üzerindeki etkisi görülmektedir. Beklendiği üzere, tüm kollektör eğim açıları aylık ortalama günlük işınım değerleri yaz aylarında (Haziran-Temmuz) en yüksek değerlere ulaşırken kış aylarında (Aralık-Ocak) ise en düşük değerlere ulaşmaktadır. Tüm aylarda aylık ortalama günlük işınım değerlerinin kollektör eğim açısı arttıkça önce arttığı daha sonra ise azaldığı görülmüş olup bu artışın en yüksek olduğu nokta (maksimum aylık ortalama günlük işınım değerlerine karşılık gelen) optimum kollektör eğim açısı olarak tanımlanabilir. Çizelge 3'te Erzincan ili için yıl içerisindeki tüm aylar için günlük ortalama işınım değerlerinin maksimum olduğu kollektör eğim açıları verilmiştir.



Şekil 2. Meteorolojiden alınan yüzeye gelen ışınım değerlerinin hesaplanan değerler ile karşılaştırılması
Figure 2. The comparison of calculated and obtained from Meteorology surface radiation values

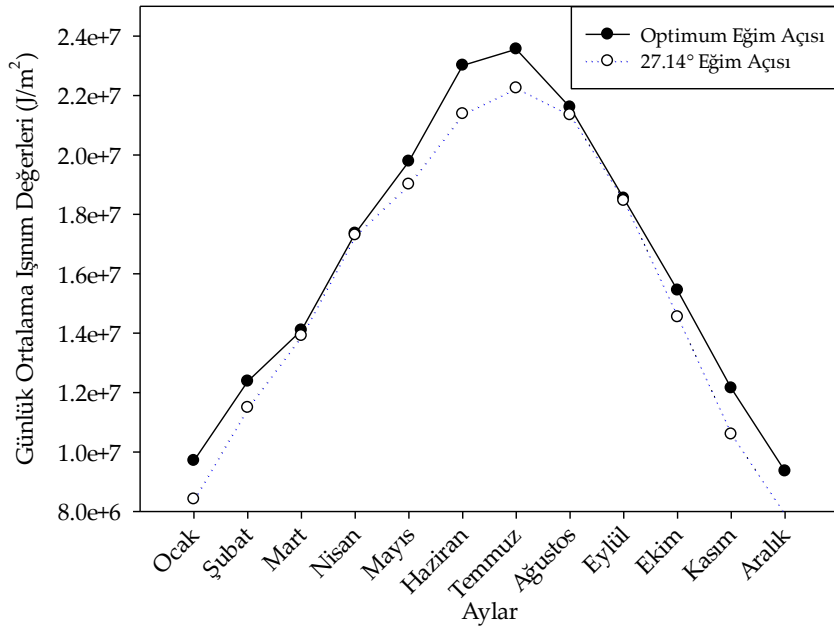


Şekil 3. Aylık ortalama günlük ışınım değerlerinin kollektör eğimi ile değişimi
Figure 3. The variation of monthly average daily radiation values with collector tilt angle

Çizelge 3. Farklı aylar için optimum kollektör eğim açıları

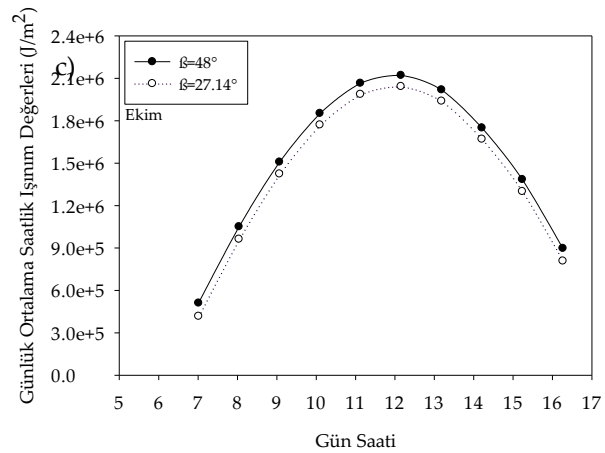
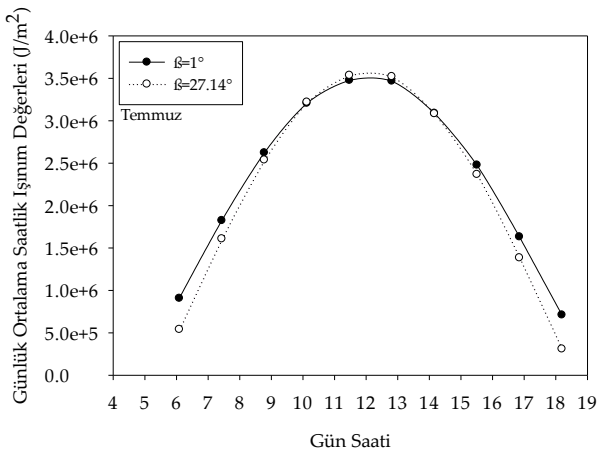
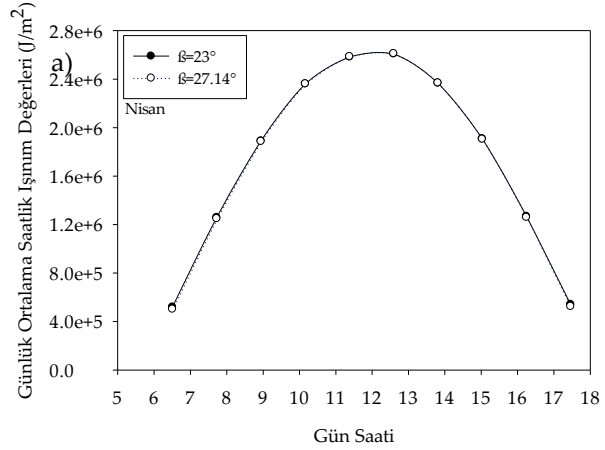
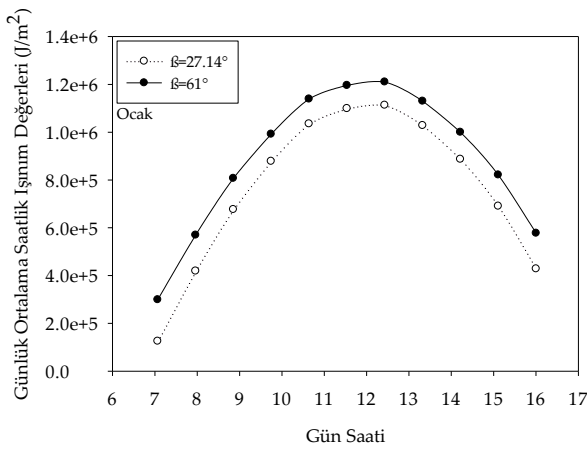
Table 3. Optimum collector tilt angles for different months

Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
61°	53°	39°	23°	7°	0°	1°	15°	32°	48°	58°	63°



Şekil 4. Aylık ortalama günlük ışınım değerlerinin optimum ve önerilen kolektör eğimi ile aylara göre değişimi

Figure 4. The variation of monthly average daily radiation values with optimum and suggested collector tilt angle according to months



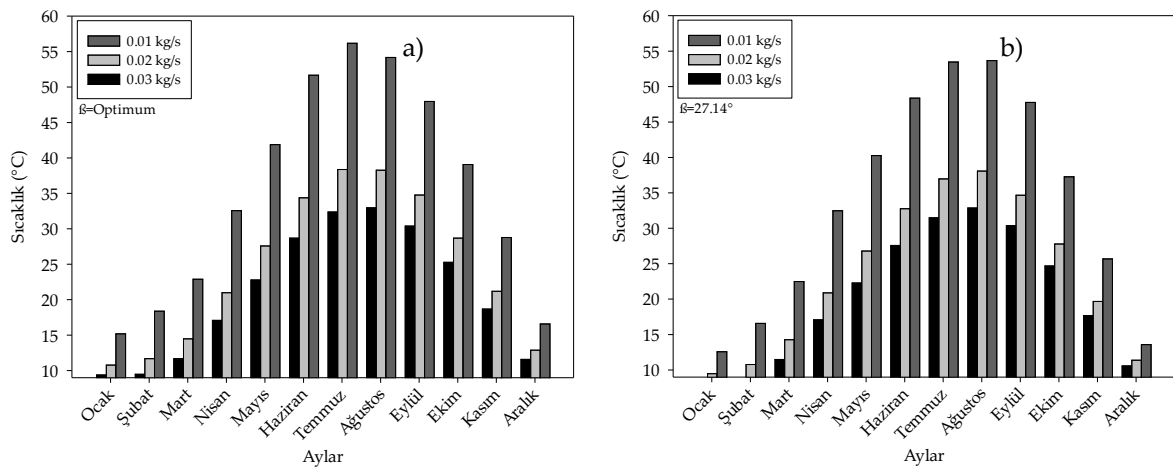
Şekil 5. Günlük ortalama saatlik ışınım değerlerinin optimum ve önerilen kolektör eğimi ile aylara göre değişimi a) Ocak, b) Nisan c) Temmuz ve d) Ekim

Figure 5. The variation of daily average hourly radiation values with optimum and suggested collector tilt angle according to months a) January, b) April, c) July and d) October

Aylık ortalama günlük ışınlam değerlerinin her bir ay için belirlenen optimum kolektör eğim açlarına göre ve yerleşimde önerilen 27.14° kolektör eğim açısına (Eren, 2019) göre değişimi Şekil 4'te verilmiştir. Mart, Nisan, Mayıs, Ağustos ve Eylül aylarında önerilen kolektör açısının kullanılması günlük ortalama ışınlam değerlerinde büyük oranda (%5'ten az) değişiklik göstermezken, Ocak, Şubat, Haziran, Temmuz, Ekim, Kasım ve Aralık aylarında ise önerilen kolektör eğim açısının kullanılması sırasıyla %13.36, %7.19, %7.08, %5.56, %5.83, %12.76 ve %15.55 daha az aylık ortalama günlük ışınlam değerlerinin elde edilmesine sebep olmaktadır.

Günlük ortalama saatlik ışınlam değerlerinin gün saatine göre değişimi optimum ve önerilen kolektör eğim açıları kullanılarak mevsimlerin orta ayları olan Ocak, Nisan, Temmuz ve Ekim ayları için sırasıyla Şekil 5a), Şekil 5b), Şekil 5c) ve Şekil 5d)'de verilmiştir. Nisan, Temmuz ve Ekim ayları için günlük ortalama saatlik ışınlam değerlerinde önemli bir değişim olmazken (%5'ten az), Ocak ayında %8 ile %26 arasında değişmektedir.

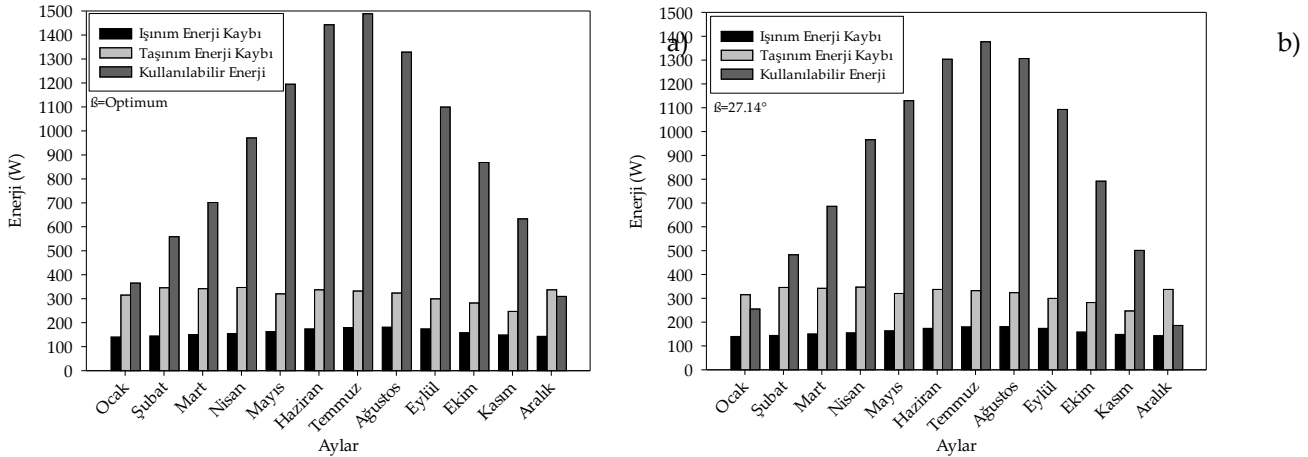
Kolektöre giren farklı debilerdeki suyun çıkış sıcaklığının aylara göre değişimi optimum ve önerilen kolektör eğim açlarına göre Denklem (16) kullanılarak hesaplanmış ve sırasıyla Şekil 6a) ve Şekil 6b)'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, su debisi arttıkça kolektör çıkış sıcaklıkları tüm aylarda düşmektedir. En yüksek su çıkış sıcaklıklarına ulaşılan Temmuz ayında 0.01 kg/s, 0.02 kg/s ve 0.03 kg/s debileri için optimum kolektör eğim açısında sırasıyla 56.25°C , 38.45°C ve 32.45°C sıcaklıkları elde edilmiştir. Ayrıca, önerilen ve optimum kolektör eğim açıları karşılaştırıldığında su çıkış sıcaklıklarında %18.02'ye varan artışlar görülmektedir.



Şekil 6. Su debisinin kolektör çıkış sıcaklığı etkisinin farklı aylar ile değişimi a) Optimum kolektör eğim açısı, b) Önerilen kolektör eğim açısı

Figure 6. The effect of water flow rate on water outlet temperature with different months a) optimum tilt angle, b) suggested collector tilt angle

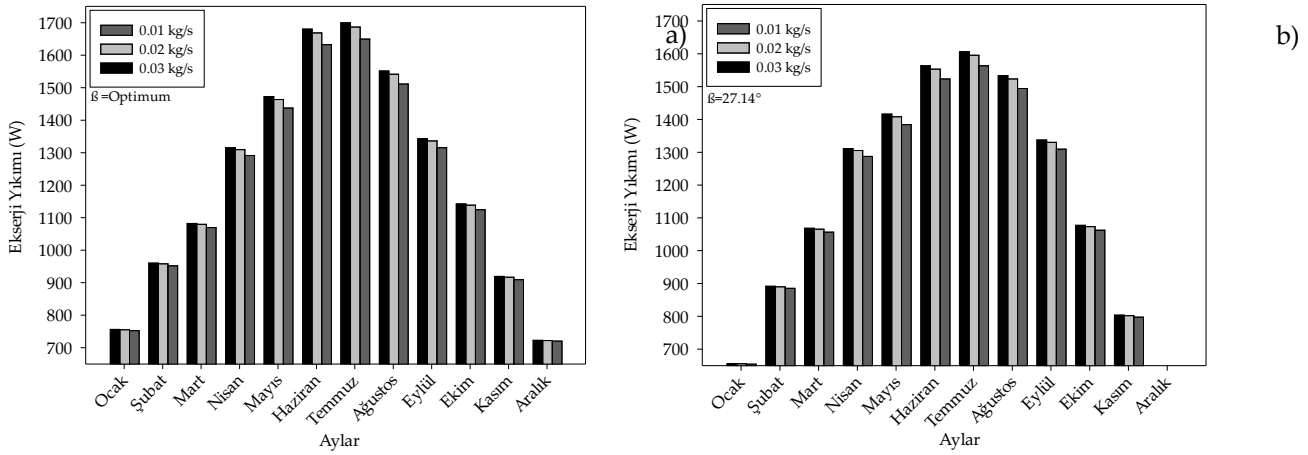
Kolektördeki toplam enerji dengesinin aylara göre değişimi optimum ve önerilen kolektör eğim açlarına göre Denklem (15) kullanılarak hesaplanmış ve sırasıyla Şekil 7a) ve Şekil 7b)'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere taşınım ile kaybedilen enerji miktarı ışınlam ile kaybedilen enerji miktarından fazla olmuştur. Ocak ve Aralık ayları dışında kullanılabilir enerji miktarı toplam kaybedilen enerji miktarı ile karşılaştırıldığında optimum ve önerilen kolektör eğim açlarına göre sırasıyla %11.91-%65.37 ve %1.86-%62.56'ya kadar fazla olduğu görülmüştür. Ocak ve Aralık aylarında ise toplam kaybedilen enerji miktarı kullanılabilir enerji miktarı ile karşılaştırıldığında optimum ve önerilen kolektör eğim açlarına göre sırasıyla %20.00-%35.62 ve %7.53-%61.18 arasında fazla olduğu görülmüştür.



Şekil 7. Kollektör enerji dengesinin aylara göre değişimi a) Optimum kollektör eğim açısı, b) Önerilen kollektör eğim açısı

Figure 7. The variation of energy balance with different months a) optimum tilt angle, b) suggested collector tilt angle

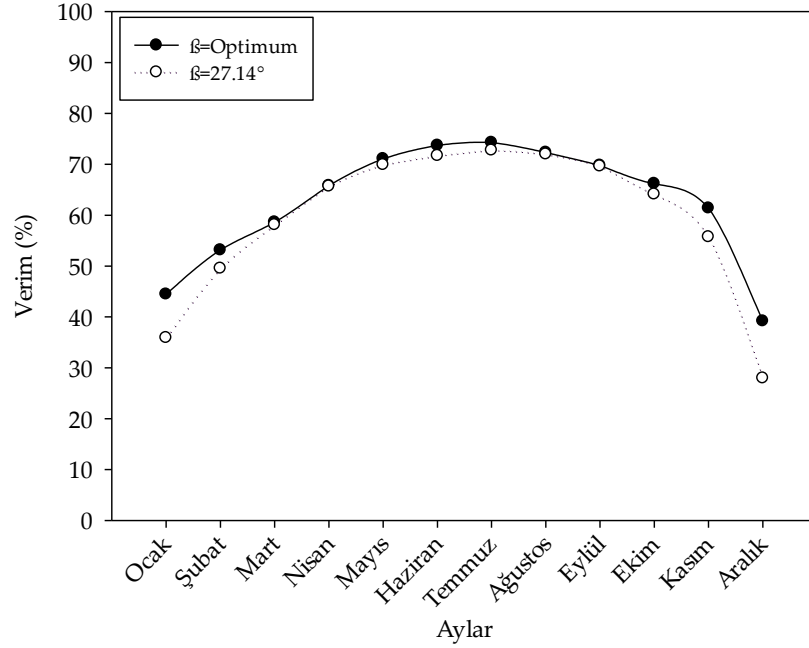
Kollektöre giren farklı debilerdeki suyun kollektördeki ekserji yıkımına etkisinin aylara göre değişimi optimum ve önerilen kollektör eğim açlarına göre Denklem (32) kullanılarak hesaplanmış ve sırasıyla Şekil 8a) ve Şekil 8b)'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, su debisi arttıkça kollektörde oluşan ekserji yıkımı tüm aylarda artmaktadır. Kollektöre giren suyun debisinin 0.03 kg/s olduğu durumlarda debinin 0.01 kg/s ve 0.02 kg/s olduğu durumlara göre ekserji yıkımında optimum kollektör açısına göre sırasıyla %0.36-%2.94 ve %0.10-%0.76 arasında, önerilen kollektör açısına göre sırasıyla %0.16-%2.67 ve %0.05-%0.68 arasında artış görülmüştür.



Şekil 8. Su debisinin kollektör ekserji yıkımına etkisinin farklı aylara göre değişimi a) Optimum kollektör eğim açısı, b) Önerilen kollektör eğim açısı

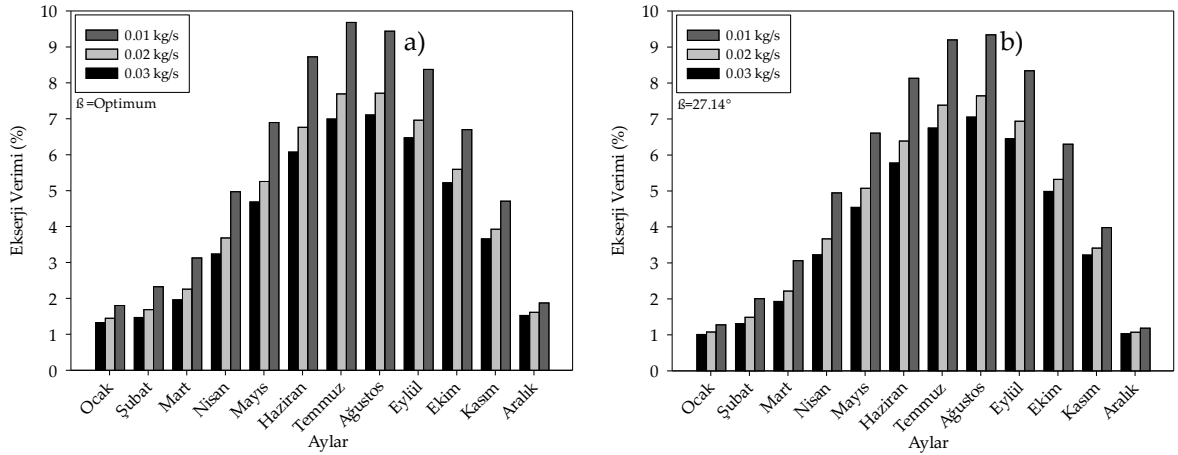
Figure 8. The effect of water flow rate on collector exergy destruction according to different months a) optimum tilt angle, b) suggested collector tilt angle

Kollektör enerji veriminin aylara göre değişimi optimum ve önerilen kollektör eğim açlarına göre Denklem (18) kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 9'da verilmiştir. Mart, Nisan, Mayıs, Temmuz, Ağustos, Eylül ve Ekim aylarında önerilen kollektör açısının kullanılması enerji veriminde büyük oranda (%5'ten az) değişiklik göstermezken, Ocak, Şubat, Kasım ve Aralık aylarında ise önerilen kollektör eğim açısının kullanılması enerji veriminde sırasıyla %19.26, %6.83, %9.20 ve %28.62 azalmaya sebep olmaktadır.



Şekil 9. Kollektördeki enerji veriminin farklı aylar ile değişimi

Figure 9. The variation of collector energy efficiency with different months



Şekil 10. Su debisinin kollektör ekserji verimine etkisinin farklı aylar ile değişimi a) Optimum kollektör eğim açısı, b) Önerilen kollektör eğim açısı

Figure 10. The effect of water flow rate on collector exergy efficiency according to different months a) optimum tilt angle, b) suggested collector tilt angle

Kollektöre giren farklı debilerdeki suyun kollektördeki ekserji verimine etkisinin aylara göre değişimi optimum ve önerilen kollektör eğim açılarına göre Denklem (27) kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 10a) ve Şekil 10b)'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, su debisi arttıkça kollektörde oluşan ekserji verimi tüm aylarda azalmaktadır. Kollektöre giren suyun debisinin 0.01 kg/s olduğu durumlarda debinin 0.02 kg/s ve 0.03 kg/s olduğu durumlara göre ekserji veriminde optimum kollektör eğim açısına göre sırasıyla %13.73-%27.68 ve %18.40-%37.15 arasında, önerilen kollektör eğim açısına göre sırasıyla %9.42-%27.42 ve %12.58-%36.82 arasında artış görülmüştür. Ekserji veriminin en yüksek olduğu 0.01 kg/s'de Mart, Nisan, Mayıs, Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarında önerilen kollektör eğim açısının kullanılması ekserji veriminde büyük oranda (%5'ten az) değişiklik göstermezken, Ocak, Şubat, Haziran, Temmuz, Ekim, Kasım ve Aralık aylarında ise önerilen kollektör eğim açısının kullanılması ekserji veriminde sırasıyla %28.65, %13.64, %6.80, %5.91, %15.41 ve %36.37 azalmaya sebep olmaktadır.

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan güneşten faydalanılması konvansiyonel enerji kaynaklarının kullanımını azaltmak adına önemlidir. Ülkemizin yüksek güneşlenme potansiyeli sebebiyle güneş kolektörleri sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Erzincan ilindeki bir güneş kolektörünün eğim açısının performans etkisi enerji ve ekserji analizleri ile parametrik olarak belirlenmiş olup aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Aylık ortalama günlük ışınlam değerlerinin kolektör eğim açısına göre değişimi incelendiğinde en düşük ve en yüksek optimum eğim açıları sırasıyla 0° (Haziran) ve 63° (Aralık) olarak belirlenmiştir.
- Mayıs, Haziran ve Temmuz aylarında önerilen ve hesaplan optimum eğim açılarının kullanımında diğer aylara kıyasla aylık ortalama günlük ışınlam değerlerinde önemli değişikliğe sebep olduğu gözlemlenmiştir.
- Ocak, Şubat, Mart, Nisan, Ağustos, Eylül, Ekim, Kasım aylarında ise önerilen ve hesaplan optimum eğim açılarının kullanımında diğer aylara kıyasla aylık ortalama günlük ışınlam değerlerinde büyük oranda değişiklik olmadığı gözlemlenmiştir.
- Günlük ortalama saatlik ışınlam değerlerinin gün saati ile değişiminin Nisan ve Ocak aylarında sırasıyla en az ve en fazla olduğu görülmüştür.
- Kolektör su debisi arttıkça çıkış sıcaklığının azaldığı ve beklenildiği üzere en yüksek değerlere Temmuz ve Ağustos aylarında ulaştığı görülmüştür.
- En yüksek kolektör enerji verimine hesaplanan optimum ve önerilen eğim açıları için sırasıyla %74.20 ve %72.76 olarak ulaşılmıştır.
- En yüksek kolektör ekserji verimine hesaplanan optimum ve önerilen eğim açıları için sırasıyla %9.70 ve %9.36 olarak ulaşılmıştır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar, bu çalışmada kullanılan verilerin temini için T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Erzincan Meteoroloji İstasyonu'na (İstasyon No:17094) teşekkür etmektedirler

SİMGELER DİZİNİ (NOMENCLATURE)

A	Kolektör yüzey alanı (m^2)
C_p	Özgül ısı (kJ/kgK)
\dot{E}_{n_k}	Kaybedilen enerji miktarı (W)
$\dot{E}_{x_{cv}}$	Kolektörün taşınım ekserji kaybı (W)
$\dot{E}_{x_{fi}}$	Kolektöre giren suyun ekserjisi (W)
$\dot{E}_{x_{fo}}$	Kolektörden çıkan suyun ekserjisi (W)
\dot{E}_{x_k}	Kolektörün toplam ekserji kaybı (W)
\dot{E}_{x_r}	Kolektörün ışınlam ekserji kaybı (W)
$\dot{E}_{x_{sun}}$	Kolektöre gelen güneş ışınlam ekserjisi (W)
G	Kolektöre gelen toplam kullanılabilir güneş enerjisi (W)
h_{cv}	Taşınım ısı transfer katsayısı (W/m^2K)
h_r	ışınlam ısı transfer katsayısı (W/m^2K)
I	Yeryüzünden yansıyan güneş ışınlamı miktarı (J/m^2)
I_0	Atmosfere giren güneş ışınlamı miktarı (J/m^2)
I_b	Yüzeye direkt gelen ışınlamı miktarı (J/m^2)

I_d	Gökyüzünden yansıyan ışınımı miktarı (J/ m^2)
I_{gs}	Güneş sabiti (W/ m^2)
$\overline{R_b}$	Aylık geometrik faktör
$R_{b,ort}$	İki saat arası ortalama geometrik faktör
\dot{S}_{gen}	Entropi Üretimi (W/K)
T_0	Ölü hâl sıcaklığı (K)
T_a	Hava sıcaklığı (K)
T_{fi}	Kollektöre giren suyun sıcaklığı (K)
T_{fo}	Kollektörden çıkan suyun sıcaklığı (K)
T_g	Kollektör yüzey sıcaklığı (K)
T_{sis}	Çevre ve kollektör yüzey sıcaklıklarının ortalaması (K)
T_{sky}	Gökyüzü sıcaklığı (K)
T_{sun}	Güneş sıcaklığı (K)
V	Rüzgâr hızı (m/s)

Yunan Harfleri (Greek symbols)

α	Kollektör yüzeyi geçirgenliği
β	Kollektör eğimi ($^\circ$)
γ	Azimut açısı ($^\circ$)
δ	Denklinasyon açısı ($^\circ$)
ϵ	Kollektör yüzeyi yayıcılığı
I_T	Toplam güneş ışınımı miktarı (J/ m^2)
k_T	Bulutsuzluk oranı
\dot{m}	Kütleli debi (kg/s)
n	1 Ocaktan itibaren gün sayısı
\dot{Q}_{cv}	Taşınım enerji kaybı (W)
\dot{Q}_r	Işınım enerji kaybı (W)
Q_u	Kullanılabilir güneş enerjisi (W)
η_i	Enerji verimi
η_{ii}	Ekserji verimi
ρ_g	Yeryüzü yansıtma katsayısı
σ	Boltzman sabiti (W/m^2K^4)
φ	Enlem açısı ($^\circ$)
ω	Saat açısı ($^\circ$)
$\omega_{1,2}$	Herhangi bir andaki saat açısı ($^\circ$)



KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Caliskan, H., 2017, "Energy, exergy, environmental, enviroeconomic, exergoenvironmental (EXEN) and exergoenvironmental (EXENEC) analyses of solar collectors", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Cilt 69, ss. 488-492.
- Ceylan, T, 2010, *İki Katlı Bir Binanın, Güneş Enerjisi Destekli Hava Kaynaklı Isı Pompasıyla Isıtılması ve Sıcak Su Eldesinin Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., Blair, N., 2020, *Solar Engineering Of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, A.B.D.
- Eren, C., 2019, *Güneş Panellerinin Yerleştirilmesinde Optimum Eğim Açısı İçin Arayüz Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Feliński, P., Sekret, R., 2017, "Effect of a low cost parabolic reflector on the charging efficiency of an evacuated tube collector/storage system with a PCM", *Solar Energy*, Cilt 144, ss. 758-766.

- Ge, Z., Wang, H., Wang, H., Zhang, S., Guan, X., 2014, "Exergy analysis of flat plate solar collectors", *Entropy*, Cilt 16, Sayı 5, ss. 2549-2567.
- Jafarkazemi, F., Ahmadifard, E., 2013, "Energetic and exergetic evaluation of flat plate solar collectors". *Renewable Energy*, Cilt 56, ss. 55-63.
- Klein, S. A., 1977, "Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces", *Solar Energy*, Cilt 19, Sayı 4, ss. 325-329.
- Kouhikamali, R., Hassani, M., 2014, "The Possibility of using Flat Plate Solar Collector Based on the Best Calculated Tilt Angle in the City of Rasht as a Case Study", *International Journal of Engineering (IJE) Transactions B: Applications*, Cilt 27, Sayı 8, ss. 1297-1306.
- Kumar, A., Kim, M. H. 2017, "Solar air-heating system with packed-bed energy-storage systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Cilt 72, ss. 215-227.
- Kumar, A., Kim, M. H., 2016, "Heat transfer and fluid flow characteristics in air duct with various V-pattern rib roughness on the heated plate: A comparative study", *Energy*, Cilt 103, ss. 75-85.
- Kumar, R., Aggarwal, R. K., Sharma, J. D., Pathania, S. 2012, "Predicting energy requirement for cooling the building using artificial neural network", *Journal of Technology Innovations in Renewable Energy*, Cilt . 1, Sayı 2, ss. 113-121.
- Lakhdar, B., Salaheddine, A., Brahim, M., Mohamed, D., 2019, "Exergetic analysis and optimization of a flat plate solar collector". *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, Cilt 14, Sayı 5, ss. 1-12.
- Moosavian, S. F., Borzuei, D., Ahmadi, A., 2021, "Energy, exergy, environmental and economic analysis of the parabolic solar collector with life cycle assessment for different climate conditions", *Renewable Energy*, Cilt 165, ss. 301-320.
- Sokhansefat, T., Kasaeian, A., Rahmani, K., Heidari, A. H., Aghakhani, F., Mahian, O., 2018, "Thermoeconomic and environmental analysis of solar flat plate and evacuated tube collectors in cold climatic conditions", *Renewable Energy*, Cilt 115, ss. 501-508.
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, *Kurulu Güç*, <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-gunes>, ziyaret tarihi: 31 Mart 2022.
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, *Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası*, <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes>, ziyaret tarihi: 31 Mart 2022.
- T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü, *Erzincan Meteoroloji İstasyonu*, İstasyon No:17094.



KENTSEL HAVA TAŞIMACILIĞINDA KULLANILACAK DİKEY İNİŞ-KALKIŞ KABİLİYETİNE SAHİP BİR HAVA ARACININ KAVRAMSAL TASARIMI VE MENZİL HESABI

¹Tolunay DAĞ , ²Tarık ÜNLER , ³Engin Hasan ÇOPUR , ⁴Uğur ÇAKIN 

^{1,2,3}Necmettin Erbakan Üniversitesi Uçak Mühendisliği Bölümü, Konya, TÜRKİYE

⁴TUSAŞ – Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. Ankara, TÜRKİYE

¹tolunaydag@gmail.com, ²tunler@erbakan.edu.tr, ³ehcopur@erbakan.edu.tr, ⁴ugur.cakin@tai.com.tr

ÖZ: Son zamanlarda meydana gelen trafik yoğunluğu ve ulaşım ihtiyacı nedeniyle kentsel hava taşımacılığına ilgi giderek artmaktadır. Birçok firma kentsel hava taşımacılığında kullanılmak üzere araçlar tasarlayarak bu sektöre yön vermek istemektedir. Buna bağlı olarak şehirlerde, hava taksiler ve uçan araç konsept fikirleri yaygınlaşmaktadır. Hem kişisel hem de kamu alanlarında kullanımı yaygınlaşacak olan bu hava araçlarının elektrikli motorlar ile çalışarak karbon salınımını en alt seviyelere taşıması düşünülmektedir. Bu çalışmada şehir içinde yaygın şekilde kullanıma sunulabilecek bir hava aracının tasarımı ve ulaşabileceği maksimum menzil değerinde iyileştirmeler gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan araç, şehir içinde hem kargo hem de sağlık alanında güvenli ulaşım olanağı sağlayabilmektedir. Aracın yaklaşık 45 km menzili ve 30 dakika havada kalma süresine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu değerler orta ölçekli bir şehirde taşımacılık yapılabilmesi için uygundur.

Anahtar Kelimeler: Dikey iniş-kalkış, Elektrikli motor, Menzil, Şehir içi hava taşımacılığı, Taşıma+seyir konsept

Conceptual Design and Range Calculation of a Vertical Landing-Takeoff Aircraft to be Used in Urban Air Mobility

ABSTRACT: Due to the recent traffic density and the need for transportation, interest in urban air mobility is increasing. Many companies want to direct this sector by designing vehicles to be used in urban air mobility. Accordingly, air taxis and flying vehicle concept ideas are becoming widespread in cities. It is thought that these vehicle, which will be used in both personal and public areas, will work with electric motors to bring carbon emissions to the lowest levels. In this study, improvements have been made in the design of an aircraft that can be used widely in the city and in the maximum range it can reach. The designed vehicle can provide safe transportation in the city, both in the field of cargo and health. It has been determined that the vehicle has a range of approximately 45 km and an endurance of 30 minutes. These values are suitable for transportation in a medium-sized city.

Keywords: Vertical take-off and landing, Electric motor, Range, Urban air mobility, Lift+cruise concept

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kentsel hava taşımacılığı (KHT) bu günlerde üzerinde yoğun uğraşlar verilen bir alandır. Şehirler arasında gerçekleştirilen hava taşımacılığının şehir içinde kullanımını güvenli olacak şekilde uyarlanarak küçük yerleşim yerleri de dahil olmak üzere tüm yerleşim tiplerinde kullanılması ve trafik sorununu azaltması üzerine çalışılmaktadır (Afonso ve diğ., 2021; Rothfeld ve diğ., 2019; Thipphavong ve diğ., 2018). Temiz enerji kullanarak şehir içi ulaşım kolaylığı sağlamak ve bunu yaparken zamandan kazanç elde edebilmek adına karadan yapılan ulaşımın gökyüzüne taşınması hedeflenmektedir (Fu ve diğ., 2019; Holden & Goel, 2016). Dikey iniş-kalkış özelliği ile şehrin her noktasında konforlu ve güvenli ulaşım sağlaması için istasyonlar veya özel park yerleri oluşturularak, araca acil durumlarda güvenli iniş

yapabilme olanağı oluşturulur (Asmer ve diğ., 2021; Patterson ve diğ., 2018; Schuchardt ve diğ., 2021). Bu görev profiline uygun olacak olan aracın geometrisi, hem aerodinamik gereksinimleri karşılayacak hem de şehir içinde park halinde bulunmaya uygun olacak şekilde dizayn edilmelidir (Silva ve diğ., 2018).

Havacılıkta uçuş süresinin veya menzilin arttırılabilmesi için çok fazla çalışma gerçekleştirilmiştir. Hava-taksi veya uçan araba kavramlarıyla tanımlanan bu araçların en büyük problemi iniş-kalkış sırasında harcadığı enerji miktarının aracın toplam enerji kapasitesinin yarısından fazla olmasıdır. Bunun sonucunda aracın menzili veya havada kalma süresi istenilen seviyelere ulaşamamaktadır (Liu ve diğ., 2021). Aracın enerji kapasitesinin bu seviyelere düşüşünün önüne geçilebilmesi için aracın kanat yapısı sayesinde üreteceği taşıma kuvveti ile minimum enerji tüketimi ve düşük itki kuvvet değerleri ile uçuşu gerçekleştirebilmesi mümkündür.

Bu çalışmada dikey iniş-kalkış yapabilen ve şehir içi yolcu taşımacılığında kullanılacak olan bir hava aracının, dinamik ölçeklendirme yöntemi kullanılarak oluşturulan prototipi ile uçuş sırasında ihtiyacı olan güç seviyesi ve bu gücün uçuş süresine etkisi üzerine çalışılmaktadır (Zhang ve diğ., 2018). Aracın ihtiyacı olan güç değerinin karşılanabilmesi için en uygun uçuş durumu seviye (*level flight*) uçuşudur. Bu aşamada hava aracı gerekli aerodinamik kuvvetler yardımıyla motor sistemini kapatarak süzülme manevraları yapabilir. Süzülme manevrası ile enerji korunumu sağlamak adına yüksek kanat alanına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple araç tandem çift kanatlı yapıya sahip şekilde tasarlanmıştır. Bu konsept sayesinde aracın taşıma kuvveti için ihtiyacı olan kanat yüzey alanında artış sağlanacak ve motor gücüne en az seviyede ihtiyaç duyularak batarya kapasitesi en verimli şekilde kullanılarak menzilin artışı sağlanmıştır. Uçuş için gerekli güç miktarı en düşük seviyelere çekilerek doğrudan menzile etki edilebilmesi mümkün olacaktır (Zhang ve diğ., 2018). Bu sınıfa ait şehir içinde kullanılacak olan araçlar sadece ulaşım değil acil durum koşullarında medikal destek veya kurtarma operasyonlarında da görev alabilecek uygunlukta sistemlerdir (Kim ve diğ., 2020).

PROBLEM TANIMI (PROBLEM DEFINITION)

Yaşanan teknolojik gelişmelerin ardından yaşam alanlarında artan araç yoğunluğu hem ses ve hava kirliliğine hem de ulaşım sorunlarına yol açmaktadır. Dolayısıyla sağlık sorunları ve zaman kaybı gibi olumsuzlukların artmasına neden olmaktadır. Bu olumsuzlukların giderilmesine yönelik olarak önerilen çözümlerden biri de kentsel hava taşımacılığı olup bu alanda dikkat çekici ilerlemeler gerçekleştirilmiştir. Kentsel hava taşımacılığı ekosisteminin en önemli unsuru ise insanların isterlerse şehrin en işlek noktasında binebilecekleri bir taksi gibi ya da evlerinin önünde park edilmiş kişisel araçları gibi kullanabilecekleri dikey iniş kalkış kabiliyetine sahip hava araçlarıdır. Bilim kurgu filmlerinin sahnelerinde izleyicileri heyecanlandıran bu araçlar, günümüzde yaşanan batarya ve elektriksel itki sistemlerindeki teknolojik gelişmelerin katkısıyla hayalî bir fikir olmaktan çıkmıştır (Federal Aviation Administration, 2020).

Kentsel hava taşımacılığı sadece yolcu transferi alanında değil sağlık hizmetlerinden kargo teslimatına kadar hizmet sektörünün her bir alanında tüm gereksinimleri karşılayacak potansiyele sahiptir. Özellikle medikal ve kargo teslimatlarında şehir içinde oluşan trafikler hem sağlık açısından hem de ekonomik giderler konusunda dikkat çekmektedir. Şehrin bir noktasından diğer noktasına gidebilmek için harcanan mesai ve kaynak göz önüne alındığında bilançosu çok fazla çıkmaktadır. Kent içinde kullanılması planlanan hava araçları sayesinde şehir içinde meydana gelen yoğunluktan etkilenmeden hem zamandan hem de harcanacak olan kaynaktan tasarruf edilmiş olacaktır.

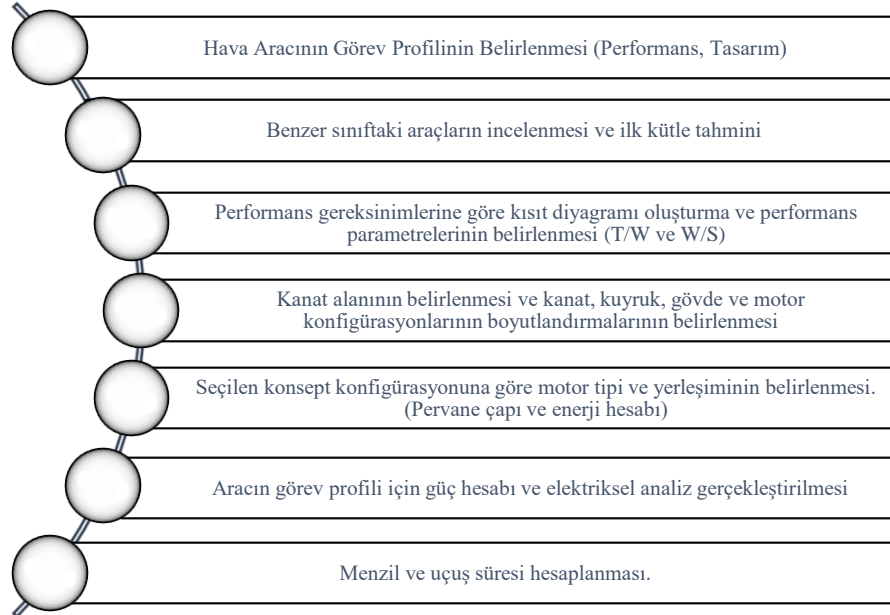
Şehir içinde uygun bir hava trafik sistemi kurulabilmesi adına tasarlanacak olan araçların boyutları ve alt sistemleri önem arz etmektedir. Özellikle motor sistemlerinin çevreci olmaması durumunda mevcut trafik sisteminde meydana gelen karbon salınımının önüne geçilmesi zorlaşır. Bu yüzden KHT aracının tahrik sistemi elektrikli motorlardan oluşturulacak olup yakıt hücreleri de yeniden şarj edilebilir olan Lityum Polimer (LiPo) pil olarak seçilmesi fosil yakıt kullanımının önüne geçilmesini sağlayabilir. Ayrıca aracın şehir içinde rahatlıkla manevra yapabilmesi adına uygun kanat ve kuyruk geometrisi ile boyutlarına sahip olması önem arz etmektedir. Gövde geometrisi yük ve araç bileşenlerinin taşınabilmesi bakımından uygun boyutlara sahip olmaması durumunda aracın beklenen görevi yüksek verimlilikte

tamamlayamama durumu meydana gelebilir.

MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Tasarım Metodolojisi (Design Methodology)

Kullanım için gerekli olan gereksinimleri karşılayacak aracın tasarımında Analiz – Sentez – Değerlendirme döngü metodolojisi takip edilmiştir. Aracın başarılı bir şekilde tamamlaması gereken görevlerin detaylı incelemesi yapılmıştır. Bu incelemeler sonucunda aracın şehir içinde görev alabilecek boyutlarda ve yüksek manevra kabiliyetine sahip bir yapıda olması gerektiği belirlenmiştir. Aracın yer aldığı sınıfa ait farklı tasarımlar incelenmiştir. Araç, Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (*National Aeronautics and Space Administration-NASA*) ve Uber tarafından yürütülen KHT projesi incelenip temiz enerji kullanarak görevlerini yüksek performansta gerçekleştirebilen ve şehir içinde uçuşa elverişli olacak şekilde uyarlanmıştır. Yapılan bu ön hazırlık çalışmalarıyla birlikte aracın kavramsal tasarım aşamaları adım adım belirlenerek sırasıyla takip edilmiştir. İzlenen adımlar aşağıda Şekil 1’de yer almaktadır.



Şekil 1. Hava Aracı Kavramsal Tasarım Aşamaları

Figure 1. Air Vehicle Conceptual Design Phases

Öncelikle aracın görev profili belirlenerek göreve uygun tasarım parametreleri belirlenmiştir. Benzer görev profiline uygun araçların sınıflandırılması yapılarak kütle verileri elde edilmiştir. Belirlenen görev performans parametrelerinden faydalanılarak kısıt diyagramı (*Constraint Analysis*) oluşturulmuştur ve bu diyagram kullanılarak kanat, kuyruk gövde ve motor gibi bileşenlerin boyutları ve tasarımı gerçekleştirilmiştir. Yine uygun pervane tipi seçimi ve boyutlandırılması bu diyagrama göre yapılmıştır.

Görev Profili, Kütle Tahmini ve Kısıt Diyagramı Belirlenmesi (Determination of Task Profile, Mass Estimation and Constraint Diagram)

KHT kapsamında tasarımı yürütülen hava araçlarının gerçekleştirilmesi planlanan toplu taşıma, kargo ve medikal ilaç ulaşımı gibi görev profilleri Şekil 2’de görsel olarak aktarılmıştır. Bu çalışma kapsamında tasarımı gerçekleştirilen hava aracı, şehir içinde hızlı ve güvenilir şekilde taşımacılığa çözüm olacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 2. Kentsel Hava Taşımacılığı Görev Profilleri
Figure 2. Urban Air Mobility Mission Profiles

Şehir içinde kullanılması için tasarlanan hava aracının performans gereksinimlerini sağlayan tasarım noktalarının belirlenmesinde NASA ve Uber çalışmalarından yararlanılmıştır. NASA ve Uber şehir içinde hava taşımacılığı için gerekli minimum parametre değerlerini belirlediği için bu değerler uygun kabul edilmiştir (Booz Allen Hamilton, 2018). Çizelge 1’de bu performans parametreleri ve değerleri bulunmaktadır.

Çizelge 1: Hava Aracı Performans Gereksinimleri
Table 1: Air Vehicle Performance Requirements

Gereksinim	Değer
Seyir Hızı	25 m/s
Durak Hızı	< 23 KCAS
Tırmanma	4.6 m/s
Maksimum İrtifa	250 m
Dikey Kalkış-İniş	0.51 m/s
Dönme Açısı	45°
Faydalı Yük	0.850 kg

Tasarım parametreleri ve gereksinimlerinin belirlenmesinin ardından gerçekleştirilen birinci aşama ilk kütle tahminidir. Aracın şehir içinde taşınması beklenen medikal veya kişisel kargoların sorunsuz bir şekilde ulaştırabilmesi adına kütle analizi önem arz etmektedir. Belirlenen görevi yapabilecek benzer sınıftaki hava araçları incelenerek boş kütle oranından hareketle toplam kalkış kütlesi belirlenmiştir. Benzer sınıflarda bulunan hava araçlarının detaylı kütle tablosu Çizelge 2’de yer almaktadır.

Çizelge 2. Kentsel Hava Taşımacılığı Hava Araçları Kütleleri
(IHS Jane's, 2014; Intelligence & Optional, 2015; Lockheed Martin, 2015; SLANTRANGE, 2015)
Table 2. Urban Air Mobility Air Vehicle Masss

	Toplam Kalkış Kütlesi (kg) W_{toplam}	Boş Kütle (kg) $W_{boş}$	Boş Kütle Oranı $\frac{W_{boş}}{W_{toplam}}$
Desert Hawk IV	3.72	2.82	%75.8
Wasp III	1.3	0.8	%61.5
Stalker VTOL	10	7.6	%76
FireFLY6 PRO	3.8	3.1	%81.6

Çizelge 2'de de görüldüğü gibi benzer hava araçlarının operasyonel kütlesi ile boş kütlesinin oranlarının ortalaması %73.7 olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada da bu değer baz alınarak hava aracının taşınması beklenen faydalı yüke göre bağlı olarak toplam kalkış kütle W_{toplam} hesaplanmıştır. Aracın taşınması beklenen faydalı yük değeri uçuş için gerekli olup $W_{faydalı\ yük}$ olarak belirlenmiştir ve yaklaşık 0.850 kg olarak kabul edilmiştir.

$$\frac{W_{boş}}{W_{toplam}} = W_{ortalama} \quad (1)$$

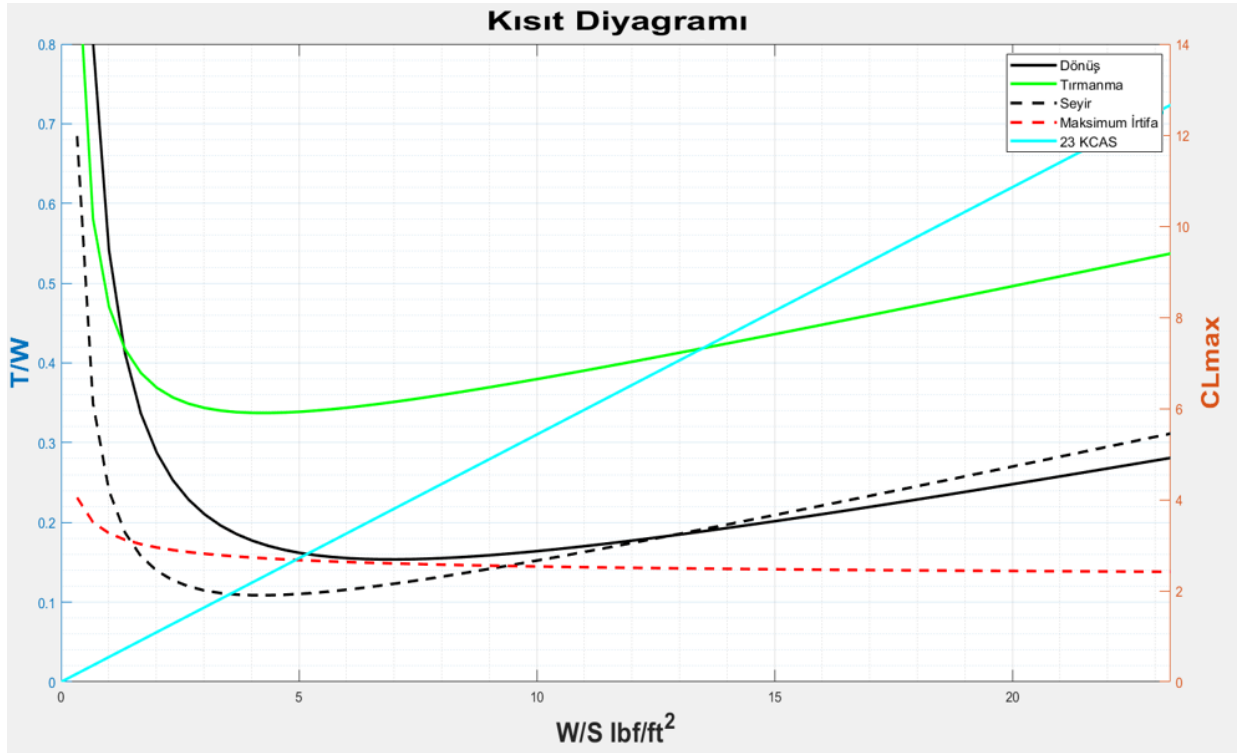
$$W_{boş} = W_{toplam} - W_{faydalı\ yük} \quad (2)$$

$$\frac{W_{toplam} - W_{faydalı\ yük}}{W_{toplam}} = W_{ortalama} \quad (3)$$

Denklem 3 kullanılarak aracın toplam kütlesi tahmini olarak 3.23 kg olarak belirlenmiştir ve bu değer ilk tahmini kütle değeri \tilde{W}_{toplam} olarak göz önünde bulundurulmuştur.

İlk toplam kütle tahmini gerçekleştirildikten sonra aracın boyutlandırılma kısmına geçebilmek için kısıt diyagramı oluşturulmuştur. Kısıt diyagramı oluşturulurken; hava aracının performans parametreleri kullanılmıştır. Bu diyagram sayesinde aracın seyir uçuşu, tırmanma, maksimum irtifadaki uçuşu gibi durumlarda ihtiyacı olan kanat yüklemesi (*Wing Loading*) 2.80 lbf/ft² ve İtki-Ağırlık oranı (*Thrust to Weight Ratio*) 0.12 olarak belirlenmiştir. Kanat yüklemesi diyagramda İngiliz birim sistemi ile elde edilmiştir. Bu değer Uluslararası Birim sistemine çevrilebilmesi adına 4.8824 değeri ile çarpılarak 13.67 kg/m² olarak bulunmuştur. Bu grafikten elde edilen çıkarımlar sonucunda toplam kütle ve ağırlık değerleri de kullanılarak aracın gerekli kanat alanı elde edilmiştir. Hava aracının tırmanma, seyir, maksimum irtifada seyir ve dönme performansı matematiksel ifadeler ile analiz edilip Şekil 3'de verilen kısıt diyagramında gösterilmiştir.

Kısıt diyagramı ve konsept tasarımda kullanılan performans parametreleri Çizelge 1'de verilen değerlerdir.



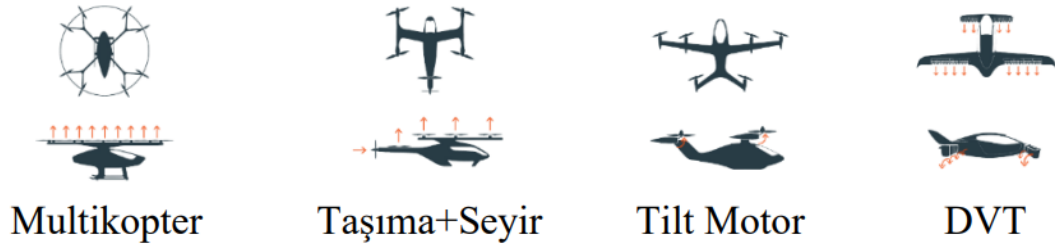
Şekil 3. Hava Aracı Kısıt Diyagramı
Figure 3. Air Vehicle Constraint Diagram

Hava Aracı Konfigürasyonu (Air Vehicle Configuration)

Performans parametreleri kullanılarak aracın tasarım parametreleri belirlendikten sonra aracın tasarım aşamasına geçilmiştir. Aracın detaylı tasarımına başlanmadan önce aracın tüm bileşenleri ayrı ayrı incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler karar matrisleriyle detaylandırılarak ortaya konulmuştur.

İlk olarak NASA tarafından belirlenen hava aracı konseptleri detaylı bir şekilde incelenmiş ve bu incelemeler sonucunda aracın şehir içinde yüksek manevra kabiliyetine sahip, dikey iniş kalkış gerçekleştirebilecek ve elektrik enerjisi kullanarak görevlerini tamamlaması göz önüne alınarak konsept seçimleri gerçekleştirilmiştir.

Aracın Genel Konsept Seçimi: NASA isterleri doğrultusunda şehir içi taşımacılık operasyonlarında kullanılması en uygun konseptler, Multikopter, Taşıma + Seyir, Tilt Motor ve DVT (Ducted Vector Thrust) konseptleridir. Bu konseptler, Şekil 4' de görsel olarak verilmiştir. Bu çalışmada şehir içi yolcu taşımacılığı için bir hava aracı tasarımı yapıldığından yolcu konforu ve güvenliği açısından en uygun olan 'Taşıma+Seyir' konsepti belirlenmiş ve seçim bu yönde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. Hava Aracı Konsept Çeşitleri
Figure 4. Types of Air Vehicle Concepts

Kanat Konfigürasyonu: Kanat konsepti olarak çift kanatlı (biplane) tandem kanat seçimi yapılmıştır.

Bunun sebepleri ise aracın stabil bir uçuş gerçekleştirmesi ve kanat üzerine etki eden devamlı yükler sonucunda kırımın önüne geçebilmektir. Çizelge 3'te kanat konsepti karar matrisi yer almaktadır.

Çizelge 3. Kanat Konsepti Karar Matrisi

Table 3. Wing Concept Decision Matrix

Parametre	Önem Oranı	Tek Kanat	Çift Kanat (Biplane)	Delta Kanat
Yük Kapasitesi	10%	2	1	3
Sürüklenme Kuvveti	10%	3	1	3
Stabilite - Kontrol	40%	2	3	1
Basınç Direnci	35%	1	3	2
Üretilebilirlik	15%	3	1	2
Toplam	100%	2.10	2.60	2.00

Oluşturulan karar matrisi ile en uygun kanat konseptinin çift kanatlı yapı olmasına karar verilmiştir.

Kanat konsepti seçimi tamamlandıktan sonra çift kanatlı (biplane) kanatlarının gövde üzerinde konumlandırılması gerçekleştirilmiştir. Bu seçim Çizelge 4'te yer alan değerlendirme sonucuna göre gerçekleştirilmiştir. Değerlendirme aşamasında kanat seçimi için dikkate alınan en önemli parametreler stabilite – kontrol ve güvenlidir. Aracın beklenen görevi istikrarlı bir şekilde yapabilmesi için bu iki parametre önem arz etmektedir.

Çizelge 4. Çift Kanatlı (Biplane) Kanat Konumu Karar Matrisi

Table 4. Biplane Wing Position Decision Matrix

Parametre	Önem Oranı	Çift Kanat (Alçak -Yüksek)	Çift Kanat (Alçak -Yüksek Tandem)	Çift Kanat (Alçak- Alçak Tandem)
Stabilite - Kontrol	30%	1	3	2
Ağırlık	15%	1	1	1
Güvenlik	35%	3	2	1
Üretilebilirlik	20%	1	3	2
Toplam	100%	1.70	2.35	1.90

Gerçekleştirilen tüm incelemeler ve analizlerden sonra aracın kanatlarının konumuna göre en uygun sistemin çift kanat (alçak – yüksek tandem) tipi yapıya sahip olmasına karar verilmiştir.

İtki Sistemi Konfigürasyonu: Dört adet dikey ve bir adet seyir motoru olmak üzere araç üzerinde beş adet elektrikli motor bulunmaktadır. Çizelge 5'te seyir motorunun yerleştirilebileceği üç farklı konumun incelendiği karar matrisi yer almaktadır. Seyir motoru konumu seçiminde üç farklı parametre göz önüne alınmıştır. Üç farklı seyir motoru konumunun mevcut sistemin üzerinde oluşturacağı yapısal ağırlık, motor verimliliği ve sürtünmeye etkisi incelenmiştir. Bu parametrelerin üçünün de önem oranı motor seçiminde birbirine yakındır. Bu değerlendirmenin sonucunda arkadan itişli tahrik sisteminin parazit sürüklenme dezavantajının daha az olduğu görülmüş, bunun yanı sıra diğer seçeneklere göre daha verimli olduğu belirlenmiştir. Bu değerlendirmeler sonucunda aracın seyir uçuşunda kullanacağı itki sistemi olarak seçilmiştir.

Çizelge 5. Seyir Motor Konumu Karar Matrisi

Table 5. Level Flight Engine Position Decision Matrix

Parametre	Önem Oranı	Önden Çekişli	Arkadan İtişli	Çift Motor
Ağırlık	30%	3	3	1
Verimlilik	40%	1	3	2
Sürtünme	30%	3	3	1
Toplam	100%	2.20	3.00	1.40

Kuyruk Takımı Konfigürasyonu: Aracın uzunlamasına ve yanal stabilizesi kuyruk elemanları tarafından sağlanır. Kuyruk yüzeyleri bu dengeyi sağlayacak ve kuyruk takımını oluşturacak şekilde tasarlanmıştır. Bu bölümde konvansiyonel kuyruk, V-kuyruk, T-kuyruk ve H-kuyruk modelleri incelenerek karar matrisinde değerlendirilmiştir. Kuyruk takımı konsepti belirlenirken dikkate alınan parametreler kararlılık – kontrol, yapısal ağırlık ve parazit sürüklemedir. Bu parametreler aracın performansına doğrudan etkili olduğu için kuyruk bileşeninde önem arz etmektedir. Çizelge 6’da kuyruk takımı konsept karar matrisi görülmektedir.

Çizelge 6. Kuyruk Takımı Konsept Karar Matrisi

Table 6. Tail Gear Concept Decision Matrix

Parametere	Önem Oranı	Geleneksel Kuyruk	T-Kuyruk	H-Kuyruk	V-Kuyruk
Ağırlık	30%	2	1	1	3
Parazit	30%	2	1	1	3
Sürükleme					
Stabilite - Kontrol	30%	2	2	3	1
Üretilebilirlik	10%	3	1	1	2
Total	100%	2.10	1.30	1.60	2.30

Çizelge 6’da yapılan değerlendirme sonucunda aracın kuyruk tipi V-kuyruk olarak seçilmiştir.

Hava Aracı Boyutlandırılması (Air Vehicle Sizing)

Kanat Profili Seçimi (Airfoil Selection)

Kanat profili seçim aşamasında birden fazla profilin analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde aday profillerin tamamının kaldırma, sürüklenme ve yunuslama momentinin hücum açısına göre değişimi dikkate alınmıştır. Bu analizler aracı performans parametrelerine ve uçuş koşullarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Aracın hızı 25 m/s ve seyir irtifası ise 100 m olarak belirlenmiştir.

$$Re = \frac{\rho V l}{\mu} \quad (4)$$

ρ : Havanın yoğunluğu (kg/m^3)

V : Havanın (aracı durağan kabul ettiğimiz için) hız değeri (m/s)

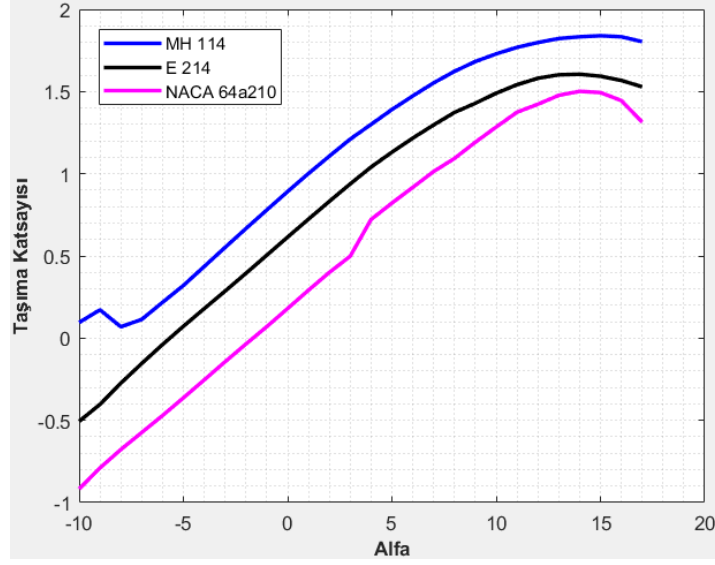
l : Kanat veter uzunluğu (m)

μ : Havanın dinamik viskozitesi ($kg/m s$)

Denklem 4’te verilen Reynolds sayısı da uçuş koşul bilgileri kullanılarak 300,000 olarak belirlenmiştir ve aerodinamik verilerin elde edilebilmesi için kanat profillerinin analizleri XFLR5 ve OpenVSP (Asmer ve diğ., 2021; Nasir ve diğ., 2021) analiz programları ile tamamlanmıştır.

Şekil 5’te üç farklı kanat profilinin iki boyutlu analizlerinden elde edilen taşıma katsayısı – hücum açısı eğrisi yer almaktadır. Bu eğriler karşılaştırıldığında MH 114 kanat profili diğer iki profile göre daha fazla taşıma değeri sağlamaktadır. Kanatların aracın gövdesine oturma açısı 0° olduğu için bu hücum açısında değerlendirmeye alınan kanat profilleri arasından en fazla taşımayı MH 114 kanat profili

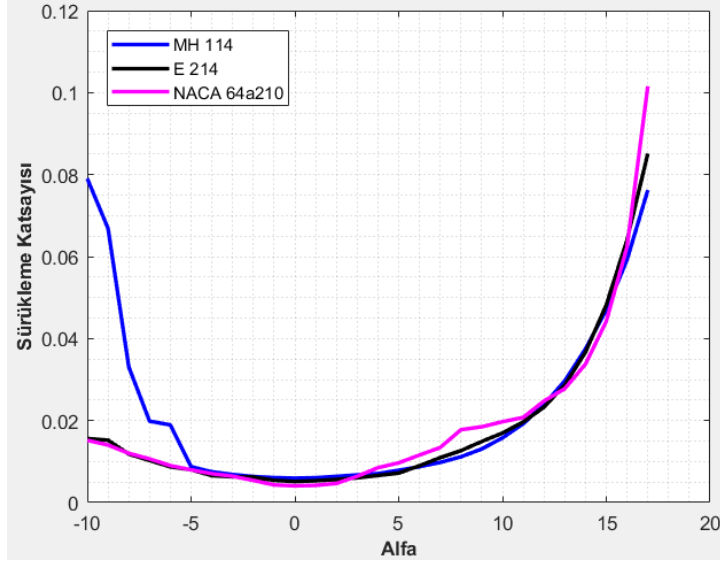
sağlamaktadır.



Şekil 5. Hücüm Açısı- Taşı Katsayısı Grafiği

Figure 5. Angle of Attack- Lift Coefficient Chart

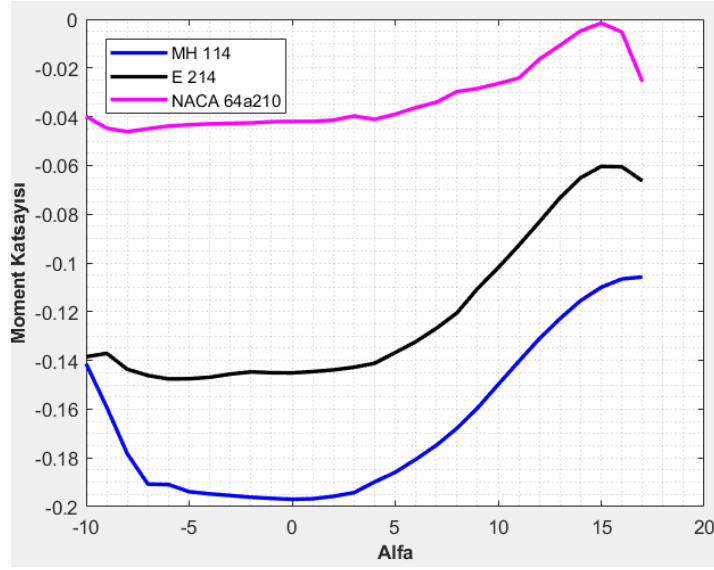
Şekil 6'da hava aracı için değerlendirilmeye alınan kanat profillerinin sürtünme kuvveti katsayıları için yapılan analiz sonuçları yer almaktadır. Bu eğri göz önüne alınca üç kanat profili arasında net bir fark görülmektedir. Yapılan analizlerde Şekil 6'da görüldüğü üzere oturma hücüm açısı göz önüne alındığında en az sürüklenme katsayısı NACA 64a210 kanat profilinde meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 6. Hücüm Açısı- Sürüklenme Katsayısı

Figure 6. Angle of Attack- Drag Coefficient

Kanat profili seçiminde değerlendirme adına önem arz eden bir diğer parametre ise moment katsayısıdır. Şekil 7'de bu parametrenin tüm kanat profilleri için hücüm açısına göre değişimi verilmiştir. Moment katsayısı aracın uzunlamasına momentinde önemli bir parametredir. Aracın seyir uçuş rejiminde burun kaldırarak yükselme manevrası yapması gereken durumlar olacaktır. Dolayısıyla araç burun kaldırarak hücüm açısını arttırmış olacaktır. Bunun sonucunda hava aracının hava ile arasında tutunma kaybı (*stall*) riski artar. Kanat profilinin sıfırın altında moment katsayısına sahip olması nedeniyle herhangi bir kontrol yüzey alanının hareketine ihtiyaç duyulmadan tekrardan hava aracının hücüm açısının normale dönmesini sağlamaktadır. Bu durumda moment değeri matematiksel olarak ne kadar düşük değerde olursa hava aracının moment dengesini sağlamak için tepkisi o kadar etkili olacaktır. Bu parametreler göz önüne alındığında bu durum için en uygun kanat profilinin MH 114 olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 7: Hücum Açısı- Moment Katsayısı
Figure 7. Angle of Attack- Moment Coefficient

Çizelge 7’de üç farklı kanat profili üzerinde yapılan analiz sonuçlarında elde edilen önemli parametre değerleri verilmiştir.

Çizelge 7. Kanat Profilleri Aerodinamik Özellikleri

Table 7. Airfoils Aerodynamic Properties

Profil	$C_{l_{max}}$	$C_{d_{min}}$	C_{m_0}	α_s (°)	α_i (°)	$(C_l/C_d)_{max}$	Stall Kalitesi
E214	1.62	0.005	-0.14	15	-14	122.24	Yumuşak
NACA 64210	1.39	0.004	-0.04	15	-14	73.2	Keskin
MH 114	1.84	0.006	-0.20	15	-10	184.3	Yumuşak

Yapılan analizlerde elde edilen Çizelge 7’deki iki boyutlu aerodinamik veriler değerlendirilerek oluşturulan karar matrisi Çizelge 8’de yer almaktadır. Kanat profili seçiminde dikkate alınan ayırıcı parametreler minimum sürükleme katsayısı, taşıma/sürükleme oranı, maksimum taşıma katsayısı ve moment katsayısıdır. Kanat profili seçiminde dikkate alınması gereken çok fazla parametre olduğundan seçim gerçekleştirilirken de doğru değerlendirmeler yapılmasına özen gösterilmiştir.

Bu parametreler dikkate alınarak incelendiğinde MH114 kanat profilinin yalnızca sürükleme katsayısı değeri bakımında geride kaldığı bu eksikliğinde diğer parametrelere göre kıyaslandığında göz ardı edilebilecek boyutlarda olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 8. Kanat Profili Seçimi Matrisi

Table 8. Airfoil Selection Matrix

Parametre	Önem Oranı	E214	NACA 64A210	MH 114
$C_{l_{max}}$	%15	87	60	95
$C_{d_{min}}$	%20	90	95	85
C_{m_0}	%15	95	60	100
α_s (°)	%10	80	95	70
α_0 (°)	%10	70	75	65
$(C_l/C_d)_{max}$	%15	85	50	100
Stall Kalitesi	%15	100	40	100
Toplam	%100	88.05	67.5	89.75

Oluşturulan karar matrisi kullanılarak en uygun kanat profili MH 114 olarak belirlenmiştir.

Diğerlerine oranla daha fazla taşıma katsayısı ve taşıma/sürüklenme oranına sahip olması nedeniyle öne çıkan bir kanat profili olduğu görülmektedir.

Hava Aracı Bileşenleri Boyutlandırılması (Dimensioning of Air Vehicle Components)

Aracın kanat profili seçimi tamamlandıktan sonra aracın geometrik boyutlandırılması tamamlanmıştır. Aracın geometrik boyutlandırılmasında kısıt diyagramından elde edilen kanat yüklemesi değeri kullanılarak kanat ve kuyruk geometrisi oluşturulmuştur. Hava aracının boyutlandırılması ile ilgili detaylı veriler Çizelge 9'da aktarılmıştır. Kısıt diyagramından elde edilen kanat alanı değeri beklenmedik taşıma kaybı oluşabilmesi durumu göz önüne alınarak %15'lik bir güvenlik katsayısı ile çarpılarak boyutlandırılmıştır.

Çizelge 9. Hava Aracı Geometrik Boyutlandırması
Table 9. Air Vehicle Geometric Dimensioning

Parametre	Sembol	Değer
Kanat Alanı	S_{toplam}	0.32 m^2
Görünüş Oranı (Aspect Ratio)	$AR_{ön} \& AR_{arka}$	$AR_{ön} = 6$ $AR_{arka} = 5.8$
Kanat Açıklığı	$b_{ön} \& b_{arka}$	$b_{ön} = 1.00 \text{ m}$ $b_{arka} = 1.00 \text{ m}$
Veter uzunluğu	$C_{ön} \& C_{arka}$	$C_{ön} = C_{arka} = 0.17 \text{ m}$
Gövde uzunluğu	lf	0.78 m
Kanat ile yatay dengeleyici arasındaki mesafe	l_{HT}	0.39 m
V kuyruk dengeliyicileri kanat alanı	S_{VT}	0.05 m^2
V kuyruk dengeliyicileri kanat açıklığı	b_{VT}	0.3 m
V kuyruk dengeliyicileri kök veter uzunluğu	$c_{r(VT)}$	0.10 m
V kuyruk dengeliyicileri uç veter uzunluğu	$c_{t(VT)}$	0.04 m
V kuyruk dengeliyicilerin düşey açısı	-	36.3°

İtki-Enerji ve Detaylı Kütle Hesaplamaları (Thrust-Energy and Detailed Mass Calculations)

Aracın itki sistemi hem dikeyde hem de seyir uçuşunda kullanılacak şekilde iki sınıfa ayrılmıştır.

Dikey İtki Sistemi (Vertical Propulsion System)

Dikey itki sistemi hava aracının iniş – kalkışı veya aracın seyir uçuşunda beklenmedik bir taşıma kaybı oluşmasında güvenli iniş sağlaması için devreye girer. Dört adet dikey motora sahip hava aracımızın iniş – kalkış veya seyir uçuşunda herhangi bir motor arızası sırasında en az iki motor kullanarak güvenli iniş yapabilmesi adına tüm motorlarının sağlayacağı toplam itki değerinin aracın toplam ağırlığının 1.5 (T/W) katı oranında olması gerektiğine karar verilmiştir. Aracın dikey kalkışında kullanacağı motor modeli ise ilk aşamada SunnySky X2814 fırçasız motoru tercih edilmiş ancak yapılan testlerde sonucunda motorun gerekli itki değerini verebilecek akım seviyesi çok fazla olduğu fark edilmiştir. Bunun için aynı itki

değerini daha düşük akım değerlerinde verebilecek olan SunnySky X4108S fırçasız motoru dikey kalkış motoru olarak seçilmiştir.

Tercih edilen dikey motorlara en uygun pervane seçimi olarak da üç farklı boyutta ve hatve açısına sahip pervaneler incelenmiştir. Bu pervaneler arasından yapılan değerlendirmelerde güç kaynağından çekilen akım değeri, verilen itki ve gerekli güç göz önüne alınmıştır. Çizelge 10'da uygun pervaneler ve bu parametre değerleri yer almaktadır. İncelenen dört pervane sonucunda hem istenilen itki değerine sahip olması hem de diğerlerine kıyasla daha az akım ve güç gerektiren APC 11x47 pervanesi tercih edilmiştir.

Çizelge 10. Benzer Sınıf Hava Araçları İtki-Pervane Değerleri

Table 10. Thrust-Propeller Values of Similar Class Aircraft

Pervane	Volt (V)	Amper (A)	İtki (gr.)	Güç (Watt)
APC 11x47	16.8	21.9	1620	324.12
APC 12x38	16.8	27.4	1870	405.52
APC 14*47	16.8	31.8	1970	470.68

Yatay İtki Sistemi (Horizontal Propulsion System)

Aracın yatay uçuşta kullanması gereken motor için itki – ağırlık oranı kısıt diyagramından belirlenmiştir. Aracın performans olarak yüksek hızlara aniden çıkabilmesi ve yüksek manevra kabiliyetine sahip olabilmesi için seçilen motorların verebileceği itki miktarı ağırlığından fazla olmalıdır. Seyir uçuşunda itki değerinin en az sürüklenme kuvveti değeri kadar olması gerektiği kabulü yapılır. Bu durum için maksimum itkiye ihtiyaç olmadığından bu koşulda gerekli olan itki değerinin ağırlığa oranının kısıt diyagramından elde edilen değer gibi olmalıdır.

$$T_{req} = D$$
$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_D \quad (5)$$

T : Seyir uçuşu itki değeri (N)

D : Seyir uçuşu sürüklenme değeri (N)

ρ : Havanın yoğunluğu (kg/m^3)

V : Havanın (aracı durağan kabul ettiğimiz için) hız değeri (m/s)

S : Kanat alanı (m^2)

C_D : Sürüklenme katsayısı (-)

Seyir uçuşunda motorun sağlaması gereken itki değeri Denklem 5'de gösterildiği gibi en az sürüklenme kuvveti kadar olabilmeli ki araç havada sabit hızda uçuş gerçekleştirebilsin.

İstenilen itki değerinin sağlaması ve ağırlık açısından da avantajlı bir motor modeli olmasından dolayı Sunnysky X2820 920 KV motor kullanılmıştır. Seçilen motor, APC 11x5.5 boyutlarındaki pervane ile istenilen T/W oranına ulaşmamızı sağlamaktadır.

Aracın tüm bileşenlerinin seçimi tamamlandıktan sonra nihai kütle tablosu oluşturulmuştur. Bu nihai kütle değerleri MATLAB yazılım dili kullanılarak her bir bileşen için ayrı ayrı belirlenmiştir ve Çizelge 11'de verilmiştir.

Çizelge 11. Hava Aracı Detaylı Kütle Tablosu

Table 11. Air Vehicle Detailed Mass Table

Hava Aracı Komponent Kütle Değerleri [kg]

Gövde	0.750
Kanatlar	0.800
Kuyruk Takımı	0.100
İniş Takımı	0.050
Dikey Motorlar ve Bileşenleri	0.460
Seyir Motoru	0.115
Bataryalar Toplam	0.550
Pervaneler Toplam	0.060
Aviyonik-Kontrol Paneli	0.160
Faydalı Yük	0.600
Toplam	3.645

Aracın tüm bileşenlerinin kütle değerlerinin belirlenmesi tamamlandıktan sonra nihai kütle değeri 3.645 kg olarak belirlenmiştir.

ELEKTRİKSEL ANALİZ (ELECTRICAL ANALYSIS)

Sistem dikey kalkış ve yatay seyir gibi iki farklı manevra yapabildiğinden dolayı elektriksel analiz 2 farklı kısımda incelenecektir.

Dikey Kalkış (Vertical Take-off)

Toplam uçuş ağırlığı belirlendikten sonra dikey motorlar için seçilen motorların hesaplaması için aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır (KNBS, 2021).

$$Motor\ İtki = \frac{Toplam\ Ağırlık * T/W}{Motor\ Sayısı} \quad (6)$$

T : Seyir uçuşu itki değeri (N)

W : Aracın ağırlık değeri (N)

Tasarımımızda kullanılan T/W oranı 1.5 ve motor sayısı 4 olduğundan dolayı her bir motorun üretmesi gereken itki miktarı 1366.9 gram olarak hesaplanmıştır. Sistemde 4S batarya ve APC11x47 bir pervane kullanıldığında yaklaşık 5.7 g/W verimle istenen güç üretilebilmektedir. Seçilen pervane ile istenen itki üretimi için çekilen akım motor başına yaklaşık 13 Amper olmaktadır. Seyir esnasında daha az sürüklenme oluşturmak için aslında daha büyük pervane ile daha büyük bir itki üretilebileceğine rağmen seyir esnasında daha az sürüklenme için küçük boyutlu pervane seçimi yapılmıştır.

Yatay Seyir (Level Flight)

Yatay seyir esnasında ihtiyaç olan itki değeri aracın toplam sürüklenme değeri belirlenerek bulunabilir (LEBLEBİCİOĞLU, 2016). Bunun için OpenVSP üzerinde yapılan analizler sonucunda elde edilen parazit sürüklenme değeri 0.02543 dir. Bunun sonucunda toplam sürüklenme değeri ise 0.05336 olarak belirlenir. Denklem 5'te yerine yazılan bu değer sonucunda seyir uçuşunda ihtiyaç duyulan en az itki değeri 659.8 gram olarak hesaplanmıştır. Bu değer, motor kayıpları ve diğer kayıplar göz önüne alınarak %10 fazlası alındığında ihtiyacımız olan itki değeri yaklaşık 725.8 gram olarak hesaplanır. Seçmiş olduğumuz motor için katalog değerleri incelendiğinde 11*5.5 pervane ile yaklaşık 6.4 g/W verimle 725.8 gramlık itki üretilebilmektedir. Bu itki üretilirken 7.5 A akım çekilecektir.

Toplam Uçuş için Gerekli Elektrik Gücü (Electric Power Required for Total Flight)

Hava aracı hem dikey hem de yatay manevra yapabildiğinden dolayı elektriksel güç tüketimi için iki

ayrı hesaplama yapılması gerekmektedir.

Dikey kalkış için yaklaşık olarak 30 saniye süre için gerekli güç hesabı aşağıdaki denkleme göre hesaplandığında her bir motor için yaklaşık 1.6W olduğu görülmektedir.

$$\text{Harcanan güç} = \frac{\text{Pil Voltajı} * \text{Çekilen Akım}}{60 * 60 (sn)} * \text{Uçuş Süresi}(sn) \quad (7)$$

Toplamda 4 motor olduğundan dolayı dikey manevra için toplam 6.4W güç harcanacağı hesaplanmıştır. Dikey seyir hem kalkış hem de iniş için kullanılacağından dolayı toplam harcanan güç 12.8W olacaktır.

Yatay seyirde her bir dakika uçuş için harcanacak güç aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır.

$$\text{Dakikada Harcanan Güç} = \frac{\text{Pil Voltajı} * \text{Çekilen Akım}}{60 dk} \quad (8)$$

Denkleme göre hesaplama yapıldığında hava aracının yatay seyirde yaklaşık 1.85 W güç tüketeceği hesaplanmaktadır.

Toplam Uçuş Süresinin Hesaplanması (Calculation of Total Flight Time)

Kullanmış olduğumuz Pil 4S ve 5000 mAh olarak seçildiğinde toplam gücümüz aşağıdaki formüle göre hesaplandığında 74W olarak hesaplanmıştır.

$$\text{Toplam Güç} = \text{Pil Voltajı} * \text{Toplam Akım} \quad (9)$$

Toplam seyir süresi hesabı için toplam üretilen güçten dikey seyir esnasında harcanan güç çıkartıldığında yatay seyir için gerekli güç bulunacaktır. Güvenli bir seyir uçuşu için kalan gücün %10'luk kısmı rezerv olarak bırakıldığında kalan güç 55W olacaktır. Yatay seyir süresini bulmak için bu gücü hava aracımızın 1 dakikada tükettiği güce böldüğümüzde havada kalma süresi dakika olarak bulunmuş olacaktır.

Bu hesaplamalar yapıldığında aracımızın havada kalma süresi yaklaşık 29.7 dakika olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 12. Hava Aracının Güç Kaynağı Özellikleri

Table 12. Air Vehicle Power Supply Features

Hava Aracının Güç Kaynağı özellikleri

Tür	LiPo
Hücre Sayısı	4S
Akım Değeri	5000 mAh
Toplam Gerilim Değeri	16.8 V
Kütlesi	0.550 kg

Toplam havadaki Seyir mesafesi için seyir hızımız olan 25m/s olarak alındığında yaklaşık 90km'lik bir hızda 44.6km'lik bir menzil hesaplanmıştır. Menzil hesaplanmasında kullanılan eşitlik Denklem 10'da verilmiştir.

$$\text{Menzil (km)} = \text{Uçuş Süresi (dk)} * 60 * \text{SeyirHızı (m/s)}/1000 \quad (9)$$

Aracın tasarım metodolojisinin tamamlanması sonucunda ortaya çıkan tasarımın kritik parametreleri Çizelge 12'de verilmiştir.

Çizelge 13. Hava Aracının Tasarım Parametreleri

Table 13. Air Vehicle Design Parameters

Hava Aracının Tasarım Parametreleri			
Parametre	Sembol	Birim	Değer
Taşıma Katsayısı	C_l	-	0.89
Maksimum Taşıma Katsayısı	$C_{l_{max}}$	-	1.75
Kanat Alanı	S	m^2	0.32
Kanat Yüklemesi	W/S	$\frac{kg}{m^2}$	11.39
Kanat Açıklığı	$b_{ön}$ b_{arka}	m	$b_{ön} = 1.00$ $b_{arka} = 1.00$
Toplam Kütle	W_{toplam}	kg	3.645
Faydalı Yük Kapasitesi	$W_{faydalı\ yük}$	kg	0.850
Seyir Hızı	V_{seyir}	m/s	25
Durak Hızı	V_{durak}	m/s	12
Menzil	R	m	44.6
Maksimum Uçuş Süresi	t_{maks}	s	29.7

SONUÇ (RESULTS)

Günümüzde hızla artan trafik dolayısı ile kentsel ulaşımında zorluklar yaşanmaktadır. KHT araçları ortaya çıkan bu trafik ve çevre sorunlarını en aza indirebilmek adına neredeyse sıfıra yakın karbon salınımı ve şehir içinde hızlı ulaşım sağlayabilmektedir. Aracın dikey iniş-kalkış özelliği sayesinde şehir içinde uygun her noktaya güvenli bir şekilde ulaşabilmesi sağlanmıştır. Çalışmada elektrik motorlu ve dikey kalkış yapabilen bu aracın üzerinde analizler yapılmıştır. Şehir içinde kullanılabilecek 90 km/h hızında ve yaklaşık 45 km menzile sahip bir araç tasarımı yapılmış ve prototipi üretilmiştir. Bu tasarım aşamalarında sırasıyla aracın görev profili belirlenmiş ve bu göreve uygun konsept tasarımı gerçekleştirilmiştir. Çalışmada üretilen prototip bilgisayar destekli teknik çizim programı ile modellenerek 3D yazıcı kullanılarak üretilmiştir. İlerleyen süreçler için özellikle hafiflik ve sağlamlık için kompozit malzemelerin kullanılması ile daha verimli bir hava aracı üretimi yapılabilecektir. Çalışmanın geliştirilecek tasarımlarında kanadın kaldırma kuvveti artırılarak yatay seyir esnasında motorun tüketeceği enerjinin azaltılmasını sağlayarak seyir mesafesinin arttırılacağı düşünülmektedir. Ayrıca kaza kırım anında güvenliği arttırmak adına 6 ya da 8 motorlu tasarımların yapılması planlanmaktadır.

TEŞEKKÜRLER (ACKNOWLEDGEMENT)

TÜBİTAK 2209-B Üniversite Öğrencileri Sanayiye Yönelik Araştırma Projeleri Desteği projesi ve TUSAŞ Lift Up programı kapsamında yürütülen bu projede desteklerinden ötürü Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma kurumuna ve Türk Havacılık ve Uzay Sanayii AŞ'ye minnettarız.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- Afonso, F., Ferreira, A., Ribeiro, I., Lau, F., & Suleman, A. (2021). On the design of environmentally sustainable aircraft for urban air mobility. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 91(January). <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102688>
- Asmer, L., Pak, H., Prakasha, P. S., Schuchardt, B. I., Weiand, P., Meller, F., Torens, C., Becker, D., Zhu, C., Schweiger, K., Volkert, A., & Jaksche, R. (2021). Urban Air Mobility Use Cases, Missions and Technology Scenarios for the HorizonUAM Project. 1–17. <https://doi.org/10.2514/6.2021-3198>
- Booz Allen Hamilton. (2018). Final Report Urban Air Mobility (UAM) Market Study. November, 160. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20190001472/downloads/20190001472.pdf>

- Federal Aviation Administration. (2020). Urban Air Mobility and Advanced Air Mobility. İçinde United States Department of Transportation. https://www.faa.gov/uas/advanced_operations/urban_air_mobility/
- Fu, M., Rothfeld, R., & Antoniou, C. (2019). Exploring Preferences for Transportation Modes in an Urban Air Mobility Environment: Munich Case Study. *Transportation Research Record*, 2673(10), 427–442. <https://doi.org/10.1177/0361198119843858>
- Holden, J., & Goel, N. (2016). Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation. 1–98. <https://www.uber.com/elevate.pdf>
- IHS Jane's. (2014). AeroVironment Wasp III UAV. Jane's Unmanned Aerial Vehicles and Targets. <https://janes.ihs.com/>
- Intelligence, E., & Optional, R. (2015). Stalker VXE30.
- Kim, S. H., Padilla, G. E. G., Kim, K. J., & Yu, K. H. (2020). Flight Path Planning for a Solar Powered UAV in Wind Fields Using Direct Collocation. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 56(2), 1094–1105. <https://doi.org/10.1109/TAES.2019.2926654>
- KNBS. (2021). No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における健康関連指標に関する共分散構造分析 Title. 6.
- LEBLEBİCİOĞLU, K. (2016). Görev Amaçlı Döner Kanat İHA Tasarımı. Tubitak Project, 35–36.
- Liu, S., Bai, J., & Wang, C. (2021). Energy acquisition of a small solar UAV using dynamic soaring. *Aeronautical Journal*, 125(1283), 60–86. <https://doi.org/10.1017/aer.2020.79>
- Lockheed Martin. (2015). Desert Hawk Datasheet. © 2015 Lockheed Martin Corporation PIRA# OWG201504006, 4. http://www.lockheedmartin.co.uk/content/dam/lockheed/data/ms2/documents/Desert_Hawk_Brochure.pdf
- Nasir, R. E. M., Tajuddin, N. F., Muta'ali, A. B. A., Kuntjoro, W., Wisnoe, W., & Romli, F. I. (2021). The Effect of Inboard and Outboard Wing Sweep Angles to Lift-to-Drag Ratio of a Compound Wing-Body Using Panel Code. *Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation*, 53(2), 155–164. [https://doi.org/10.6125/JoAAA.202106_53\(2\).07](https://doi.org/10.6125/JoAAA.202106_53(2).07)
- Patterson, M. D., Antcliff, K. R., & Kohlman, L. W. (2018). A proposed approach to studying urban air mobility missions including an initial exploration of mission requirements. *Annual Forum Proceedings - AHS International*, 2018-May.
- Rothfeld, R., Straubinger, A., Fu, M., Al Haddad, C., & Antoniou, C. (2019). Urban air mobility. İçinde Demand for Emerging Transportation Systems: Modeling Adoption, Satisfaction, and Mobility Patterns. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815018-4.00013-9>
- Schuchardt, B. I., Becker, D., Becker, R.-G., End, A., Gerz, T., Meller, F., Metz, I. C., Niklaß, M., Pak, H., Schier-Morgenthal, S., Schweiger, K., Shiva Prakasha, P., Sülberg, J. D., Swaid, M., Torens, C., & Zhu, C. (2021). Urban Air Mobility Research at the DLR German Aerospace Center – Getting the HorizonUAM Project Started. 1–12. <https://doi.org/10.2514/6.2021-3197>
- Silva, C., Johnson, W., Antcliff, K. R., & Patterson, M. D. (2018). VTOL urban air mobility concept vehicles for technology development. 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, 1–16. <https://doi.org/10.2514/6.2018-3847>
- SLANTRANGE. (2015). FireFly6 SL3p. <https://www.landviewdrones.com/firefly6sl2p>
- Thippavong, D. P., Apaza, R. D., Barmore, B. E., Battiste, V., Belcastro, C. M., Burian, B. K., Dao, Q. V., Feary, M. S., Go, S., Goodrich, K. H., Homola, J. R., Idris, H. R., Kopardekar, P. H., Lachter, J. B., Neogi, N. A., Ng, H. K., Oseguera-Lohr, R. M., Patterson, M. D., & Verma, S. A. (2018). Urban air mobility airspace integration concepts and considerations. 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. <https://doi.org/10.2514/6.2018-3676>
- Zhang, T., Zhu, X., Zhou, Z., Wang, R., & Chen, R. (2018). Energy Management of Solar UAV Level Flight. 2018 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management, ICPHM 2018, 10–15. <https://doi.org/10.1109/ICPHM.2018.8448508>



THEVENİN TEMELLİ GERİLİM KARARLILIK İNDEKSİ KULLANILARAK DAĞITIM SİSTEMLERİNİN YENİDEN YAPILANDIRILMASI

¹Talha Enes GÜMÜŞ , ²Selçuk EMİROĞLU , ³Selim MERİÇ , ⁴Mustafa TURAN 

^{1,2,4}Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Sakarya, TÜRKİYE

³Sakarya Üniversitesi Bilgisayar Araştırma ve Uygulama Merkezi, Sakarya, TÜRKİYE

¹tgumus@sakarya.edu.tr, ²selcukemiroglu@sakarya.edu.tr, ³smeric@sakarya.edu.tr,

⁴turan@sakarya.edu.tr

Geliş/Received: 25.03.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 06.07.2022

ÖZ: Dağıtım sistemleri elektrik enerjisinin son tüketiciye ulaştığı sistemler olduğundan, sistemlerin optimal çalışması büyük önem taşımaktadır. Dağıtım sistemlerinin maksimum fayda ile çalışabilmesi; sistemin yeniden yapılandırılması, dağıtık üretim (DÜ) tesislerinin optimal bağlantı noktaları ve boyutlarının belirlenmesi gibi amaçları olan bir optimizasyon problemini ortaya çıkarır. Bu problemin uygun çözümü şebeke kayıplarının azaltılması, gerilim profilinin iyileştirilmesi ve sistemin daha kararlı çalışması gibi faydaların maksimize edilmesinde çok önemli bir rol oynar. Bu amaçla problem; kayıpların azaltılması, gerilim profilinin iyileştirilmesi ve kararlılığın artırılması için çok amaçlı bir optimizasyon problemi olarak modellenmiştir. Gerilim kararlılığını arttırmak için Thevenin eşdeğer devre modeline dayalı bir gerilim kararlılık indeksi uyarlanmıştır. Oluşturulan denklemler cıvık mantar optimizasyon algoritması ile çözümlenerek, Radyal Dağıtım Sistemi (RDS) yeniden yapılandırılmış ve DÜ tesislerinin bağlantı noktaları ile boyutları belirlenmiştir. Önerilen yaklaşım IEEE 33 baralı test sistemine uygulanarak sistem kayıplarının azaldığı, sistemin bara gerilim değerlerinin arttığı ve sistemin daha kararlı hale geldiği doğrulanmıştır. Önerilen yaklaşım, farklı kararlılık indeksi kullanılarak yapılan optimizasyon çalışmaları ile karşılaştırılmış ve sonuçların diğer yaklaşımlardan daha iyi çıktığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Dağıtık üretim (DÜ) tesisleri, cıvık mantar algoritması (SMA), Thevenin temelli gerilim kararlılık indeksi, Dağıtım sistemleri optimizasyonu, Optimal Dağıtık üretim yerleşimi ve boyutlandırılması

Reconfiguration of Distribution Systems Using Thevenin Based Voltage Stability Index

ABSTRACT: The optimal operation of distribution systems is of great importance since the distribution systems are ended with consumers. It generates an optimization problem to determine the ideal distribution system reconfiguration, as well as the optimal location and size of distributed generation (DG) facilities so that distribution systems can benefit the most. The optimal solution of the problem plays a significant role in maximizing benefits such as reducing power losses, improving voltage profile, and more stable operation of the system. So, the problem is formulated as a multi-objective optimization problem to decrease power losses, improve voltage profile and increase stability. A voltage stability index based on Thevenin equivalent circuit model has been adapted to improve voltage stability. The multi-objective optimization problem has been solved by using the Slime Mould Optimization algorithm to obtain the optimal location and size of DGs along with the reconfiguration of the radial distribution system. The proposed approach has been tested on IEEE 33 bus test system. By applying the proposed approach to the IEEE 33 bus test system, it has been verified that the power losses are reduced, the voltage profile of the system is improved, and the system becomes more stable. The proposed approach has also been compared with several studies using different optimization techniques and stability indexes. The results show that

the proposed approach gives better results than the compared studies in terms of power loss, improvement of voltage profile, and stability.

Keywords: *Distributed Generations (DG), Slime mould algorithm (SMA), Thevenin-based voltage stability index, Distribution systems optimization, Optimal distributed generation placement and sizing*

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik dağıtım sistemleri, elektrik enerjisinin son tüketiciye ulaştırılan sistemlerdir. İletim sistemleri ağ yapıda olmasına rağmen dağıtım sistemleri radyal olarak işletilir. Dağıtım sistemlerinde normalde açık ve normalde kapalı olmak üzere iki çeşit anahtarlama vardır. Sistemin radyal olarak çalıştırılabilmesi ve yeniden yapılandırılması mevcut anahtarların pozisyonları değiştirilerek yapılır (Syahputra ve diğ., 2016).

Dağıtım sisteminin yeniden yapılandırılması belirli amaç fonksiyonları ve kısıtlar ile yapılır. Aktif güç kayıplarının azaltılması, gerilim dalgalanmalarının azaltılması, sistem kararlılığının artırılması ve bara gerilim değerlerinin belirli sınırlar içinde tutulması bunlardan bazılarıdır (Mishra ve diğ., 2017, Mahdavi ve diğ., 2021). Analitik çözüm yöntemlerinin, en iyi çözüme yakınsamayı küçük bir arama uzayıyla basit ve doğrusal optimizasyon problemlerini çözmede etkili olduğu bilinmektedir. Bazı çalışmalarda yeniden yapılandırma problemleri analitik çözüm yöntemleri kullanılarak çözülmüştür [4]. Fakat analitik çözüm yöntemleri lineer olmayan problemlerin çözümünde daha az verimli olduğundan (Khodr ve diğ., 2009), sezgisel yöntemler yeniden yapılandırma problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Sezgisel yöntemler lineer olmayan problemlerin çözümünde hızlı olması, bulunan sonuçların yüksek doğrulukta olması ve kolay uygulanabilirliği nedenleri ile yeniden yapılandırma problemlerinin çözümünde sıkça kullanılmaktadır (Arun ve Aravindhababu 2009; McDermott ve diğ., 1999). Dağıtım sistemlerine yenilenebilir enerji kaynakları eklenmesi durumunda da belirli amaç fonksiyonları ve kısıtlar ile yeniden yapılandırma problemi sezgisel algoritmalar kullanılarak çözülmektedir (Imran ve diğ., 2014). Dağıtım sistemlerinde yeniden yapılandırma problemlerinde sistemin kararlılık durumu VSI (Ranjan, ve diğ., 2003) indeksi ile belirlenmiştir (Nguyen ve Truong 2015; Rawat ve Vadhera 2019).

Bu çalışmada dağıtım sistemlerinde yeniden yapılandırma problemi SMA optimizasyon algoritması kullanılarak çözülmüştür. Optimizasyon probleminin amaç fonksiyonu olarak aktif güç kayıplarının azaltılması, bara gerilim profilinin iyileştirilmesi ve sistemin kararlılığın iyileştirilmesi için Thevenin eşdeğer devresi temelli gerilim kararlılık indeksi kullanılmıştır. Önerilen yaklaşım IEEE 33 baralı test sistemine uygulanmıştır. Önerilen yaklaşımın sistemin aktif güç kayıplarını azalttığı, gerilim profilini iyileştirdiği ve sistemin daha kararlı hale getirdiği görülmüştür. Önerilen yaklaşım ile elde edilen sonuçların farklı optimizasyon teknikleri ve farklı gerilim kararlılık indeksi kullanılarak elde edilen sonuçlara göre daha iyi olduğu görülmüştür.

Cıvık Mantar Algoritması (Slime Mould Algorithm - SMA)

(Li ve diğ., 2020)'de önerilen cıvık mantar algoritması (SMA), dağıtım sistemlerinde yeniden yapılandırma ile dağıtık üretimlerin (DÜ) boyutlandırma ve bağlantı yerinin bulunarak kayıpları ve gerilim profilini optimize etmek için bu çalışmada kullanılan yeni bir meta-sezgisel yöntemdir.

Doğadaki cıvık mantarların hava kokuları yardımıyla besine erişmesine dayalı cıvık mantar algoritması (SMA) yeni bir stokastik optimizasyon algoritmasıdır (Abid ve diğ., 2022). Cıvık mantarlar genel olarak Soğuk ve nemli bölgelerde yaşayan Physarum polycephalum adı verilen tek hücreli bir mantar türünün besin arama ve beslenme aşamalarından esinlenerek geliştirilmiştir.

Bu bölümde, SMA'nın temel prosedürü açıklanmıştır. Algoritma, cıvık mantarın yiyecek arama işlemi sırasında davranışsal ve morfolojik özellikleri-değişiklikleri simüle ederek çalışır (Li ve diğ., 2020).

Algoritmanın akış şeması Şekil 1'de gösterilmektedir. SMA'nın ilk adımı, diğer meta-sezgisel optimizasyonlar gibi, rastgele bir popülasyon seti oluşturmaktır. Bu durum aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

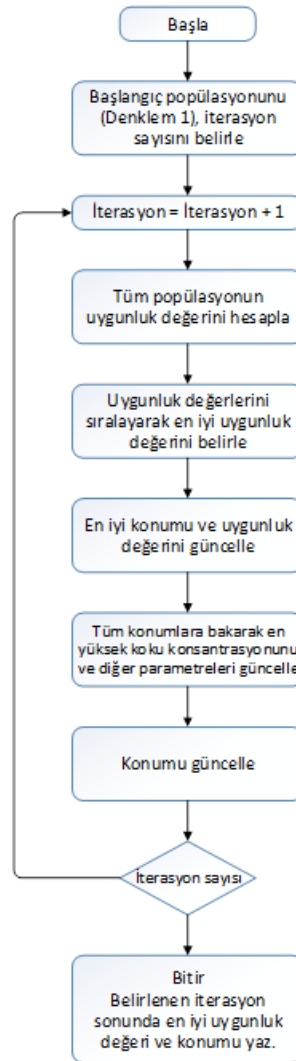
$$X = rand(UB - LB) + LB \quad (1)$$

burada LB ve UB, parametre setindeki her parametrenin alt ve üst sınırlarını belirtir ve *rand*, [0,1] arasındaki tek tip rasgele sayıları temsil eder. Sonraki adım, popülasyon setindeki her birey için uygunluk fonksiyon değerini hesaplamak ve başlangıç konumlarını güncellemektir.

$$S = Amaç(X)$$

$$Kokuİndeksi = Sırala(S) \quad (2)$$

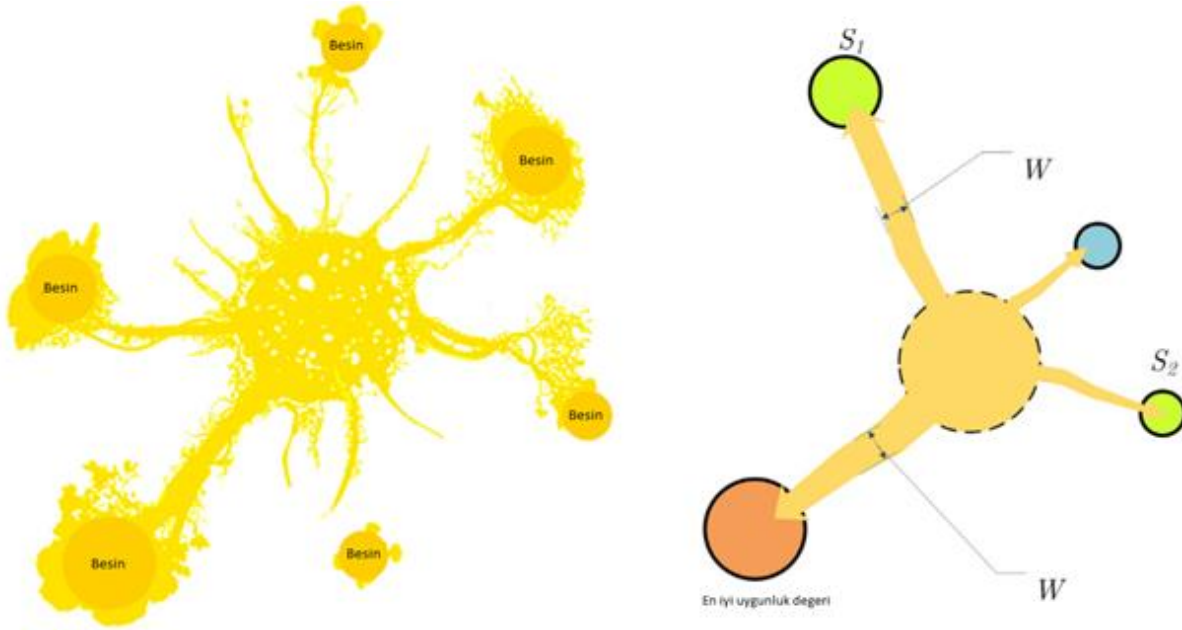
Şekil 2. de görüldüğü gibi bir damar bir besin kaynağına yaklaştığında, biyo-osilatörün damar boyunca sitoplazmik akışı artıran yayılan bir dalga (Nakagaki ve diğ., 2000) ürettiğini ve sitoplazma ne kadar hızlı akarsa damar o kadar kalınlaşmaktadır. Böylelikle Cıvık mantarlar, damarlardaki sitoplazmik akışı düzenlemek için biyolojik osilatörün yayılma dalgasına son derece bağımlıdır ve onları besin alımı için daha iyi bir konuma yerleştirir (Li ve diğ., 2020).



Şekil 1. Cıvık Mantar Algoritması

Figure 1. Slime Mold Algorithm

Cıvık mantarların damar genişliğindeki varyasyonları modelleyebilmek için, ince ayar parametreleri W , v_b ve v_c değişiklikleri gerçekleştirmek için kullanılır. W , çeşitli gıdaların yakınında cıvık mantarın salınım hızını taklit ederek, onların daha kaliteli yiyecek bulduğunda yiyecekleri daha hızlı takip etmesine olanak tanır, dolayısıyla optimal yiyecek kaynaklarını keşfetmedeki verimliliğini artırır.



Şekil 2. Cıvık mantarın yiyecek arama morfolojisi ve algoritmada uygunluk değerinin elde edilmesi (Li ve diğ., 2020)

Figure 2. Foraging morphology of slime mold and obtaining the fitness value in the algorithm (Li et al. 2020)

Gıda yoğunluğu W aşağıdaki ifade ile gösterilir:

$$\vec{W}(Koku\ indeks(j)) = \left\{ \begin{array}{l} 1 + rand * \log\left(\frac{bF-S(j)}{bF-wF} + 1\right) \\ 1 + rand * \log\left(\frac{bF-S(j)}{bF-wF} + 1\right) \end{array} \right\} Koşul\ Değer \quad (3)$$

Koşul üst yarıda yer alan bireyleri belirtir. bF ve wF sırasıyla mevcut popülasyonda en iyi uygunluğu ve en kötü uygunluk değerini gösterir.

Cıvık mantarların besine yaklaşma davranışını matematiksel olarak aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$X_{i+1} = \begin{cases} X_t^b + vb \cdot (W \cdot X_t^A - X_t^B) & rand < p \\ vc \cdot X_t & rand \geq p \end{cases} \quad (4)$$

burada t , parametresi mevcut iterasyonu temsil eder, X_t^b optimal bireyi- şimdiye kadarki en yüksek koku konsantrasyonuna sahip olan bireyi-yeri ifade eder. X_t^A ve X_t^B , t . iterasyonda popülasyondan rastgele seçilen iki bireydir. vb ise $-a$ ile a aralığındaki bir parametredir. vc , 1'den 0'a azalan bir değişkendir. W , cıvık mantarın ağırlığını gösterir. p , aşağıdaki şekilde hesaplanan bir değişkendir.

$$p = \tanh|S(j) - DF|, j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

burada $S(j)$, X 'in uygunluk fonksiyonu değeridir. n , popülasyon sayısıdır. DF şu ana kadarki en iyi uygunluk fonksiyonu değeridir. a için formül aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} vb &= [-a, a] \\ a &= artanh\left(-\frac{t}{t_{max}} + 1\right) \end{aligned} \quad (6)$$

Burada t mevcut iterasyon, t_{max} maksimum iterasyon sayısıdır.

Koşul yiyecek kalitesine göre arama örüntüsünü ayarlamak için cıvık mantarı simüle eder. Besin konsantrasyonu yeterli olduğunda, bölgeye yakın ağırlık daha fazladır; gıda konsantrasyonu düşük olduğunda, bölgenin ağırlığı azalacaktır, bu nedenle diğer bölgeleri keşfetmeye yönelecektir. Böylelikle cıvık mantar, gıda kaynağının kalitesine göre dinamik olarak daha iyi bir gıda kaynağı seçecektir, bu da algoritmada en uygun çözümü arayan cıvık mantara eşdeğerdir (Abid ve diğ., 2022; Li ve diğ., 2020).

Yukarıdaki prensibe dayanarak, matematiksel formül cıvık mantar yerini güncellemek aşağıdaki gibidir:

$$\vec{X}^* = \begin{cases} rand \cdot (UB - LB) + LB & rand < z \\ X_t^b + vb \cdot (W \cdot X_t^A - X_t^B) & rand < p \\ vc \cdot X_t & rand \geq p \end{cases} \quad (7)$$

SMA temel olarak sırasıyla başlatma, uygunluk fonksiyonu değerlendirme ve sıralama, ağırlık güncelleme ve konum güncelleme bileşenlerinden oluşmaktadır.

DAĞITIM SİSTEMİ YENİDEN YAPILANDIRMA PROBLEMİNİN TANIMLANMASI (DEFINING THE DISTRIBUTION SYSTEM RECONFIGURATION PROBLEM)

Dağıtım sistemlerinde bulunan anahtarların pozisyon seçimi ve sisteme yenilenebilir enerji kaynakları eklenerek dağıtım sisteminin yeniden yapılandırılması mümkündür. Yeniden yapılandırma problemi belirli amaç ve kısıtlar kullanılarak optimizasyon algoritmaları ile çözülmektedir. Bu çalışmada sistem aktif güç kayıplarının ve bara gerilimlerinde oluşabilecek dalgalanmaların azaltılması, bara gerilim kararlılık indekslerinin maksimum yapılması çoklu amaç fonksiyonu olarak kullanılmıştır. Kısıt olarak sisteme eklenecek yenilenebilir enerji kaynaklarının kapasitesinin mevcut yüklerden küçük olması ve bara gerilim değerlerinin belirli seviyede tutulması amaçlanmaktadır.

Bu çalışmada dağıtım sistemlerinin yeniden yapılandırılması problemlerinde sistemin radyal işletilmesi şartı minimum örten ağaç algoritması (Li ve Chang, 2011) ile sağlanmıştır. En az güç kaybına sahip olan hatlar seçilerek sistem radyal hale getirildikten sonra optimizasyon problemi çözülmüştür.

Çoklu Amaç Fonksiyonu (Multi-objective Function)

DÜ'lerin dağıtım sistemine eklenmesi ana trafo merkezinden gelen akımın azalmasına neden olur, bu da güç kaybının azalmasını ve gerilim profilinin gelişmesini sağlar. Ama eklenen DÜ'lerin gücünün sürekli artması başta güç kaybının azalmasını sağlarken belirli bir güçten sonra artış devam ettiği takdirde güç kaybı azalmadan artış durumuna geçebilmektedir (Aliman, 2011). Bu sebeple bu çalışmada güç kaybını azaltan (f_1), gerilim profilini iyileştiren (f_2) ve gerilim kararlılık indeksini (f_3) iyileştiren çoklu amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Üç adet DÜ kaynağının boyutu sürekli değişken ve bağlantı baraları tam sayılı değişken olmak üzere çoklu amaç fonksiyonu ile formüle edilen optimizasyon problemi aşağıda verilmiştir. Optimizasyon problemindeki tüm amaç fonksiyonları pu olarak alınmıştır.

$$\min F = \min(f_1 + f_2 + f_3) = \min \left\{ \frac{P_{Kayip}}{P_{KayipBaz}} + \sum_{k=1}^n (V_k - V_{Ref})^2 + \frac{1}{V_{SMV}} \right\} \quad (8)$$

Kısıtlar:

Güç akışı denge denklemleri eşitlik kısıtı olarak,

Baraların gerilim limitleri ve eklenen DÜ'lerin kapasitesi eşitsizlik kısıtı olarak dikkate alınmalıdır.

Aktif güç kayıplarının minimize edilmesi (Minimization of active power losses)

Dağıtım sistemlerinde bulunan anahtarların pozisyon seçimi ve sisteme yenilenebilir enerji kaynakları eklenerek dağıtım sisteminin yeniden yapılandırılması mümkündür. Yeniden yapılandırma problemi belirli amaç ve kısıtlar kullanılarak optimizasyon algoritmaları ile çözülmektedir. Bu çalışmada birinci amaç fonksiyonu olarak sistem aktif güç kayıplarının azaltılması amaçlanmaktadır. Birinci amaç fonksiyonu Denklem 9'da verildiği gibi formüle edilir.

$$f_1 = \min\left(\frac{P_{Kayıp}}{P_{KayıpBaz}}\right) \quad (9)$$

Burada $P_{Kayıp} = \sum_{k=1}^{N_{Line}} R_{Line} \cdot I_{Line}^2 \cdot P_{KayıpBaz}$ dağıtım sisteminin optimizasyon öncesi kayıp değeri olan 203 kW olarak alınmıştır.

Bara gerilim dalgalanmalarının azaltılması (Reduction of bus voltage deviation)

İkinci amaç fonksiyonu olarak optimizasyon probleminin sonucunda sistem baralarına ait gerilim değerlerinin 1 pu 'e olabildiğince yakın olması amaçlanmaktadır. Bara gerilim değerlerinin iyileştirilmesi için Denklem 10 kullanılmıştır.

$$f_2 = \sum_{k=1}^n (V_k - V_{Ref})^2 \quad (10)$$

Denklem 10 'da k bara numarasını V_{Ref} ise referans alınan bara gerilim değeri olan 1 pu 'dir.

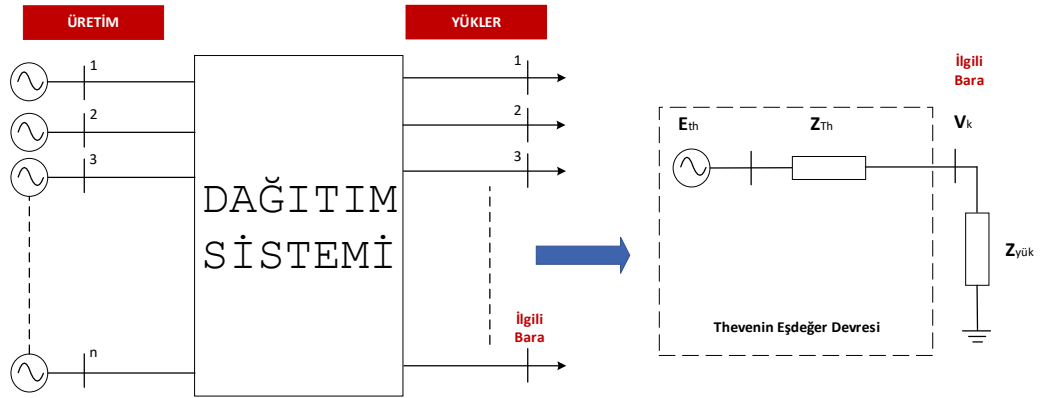
Gerilim Kararlılık İndeks (VSMV) Değerinin İyileştirilmesi (Improvement of the Voltage Stability Index Value)

Üçüncü amaç fonksiyonu olarak dağıtım sisteminde sistemin tüm baralarındaki Thevenin Eşdeğer devresi temelli gerilim kararlılık indeks (VSM_v) değerlerinin artırılması amaçlanmıştır. VSM_v değerinin maksimize etmek için çoklu amaç fonksiyonu minimizasyon mantığı ile çalıştığından 3. amaç fonksiyonu Denklem 11 de verildiği gibi kullanılmıştır.

$$f_3 = \min\left(\frac{1}{VSM_v}\right) \quad (11)$$

THEVENİN EŞDEĞER DEVRESİ TEMELLİ GERİLİM KARARLILIK İNDEKSİ (THEVENIN EQUIVALENT CIRCUIT BASED VOLTAGE STABILITY INDEX)

Güç sisteminin herhangi bir yük barasından görünen Thevenin eşdeğeri, baradan yapılan ölçümler ile kestirilmesi mümkündür (Hashmi ve diğ., 2015; Tobón ve diğ., 2014; Vu ve diğ., 1999; Yuan ve Li 2014). Şekil 3'de güç sistemine ilgili baradan bakıldığında görülen Thevenin eşdeğeri verilmiştir.



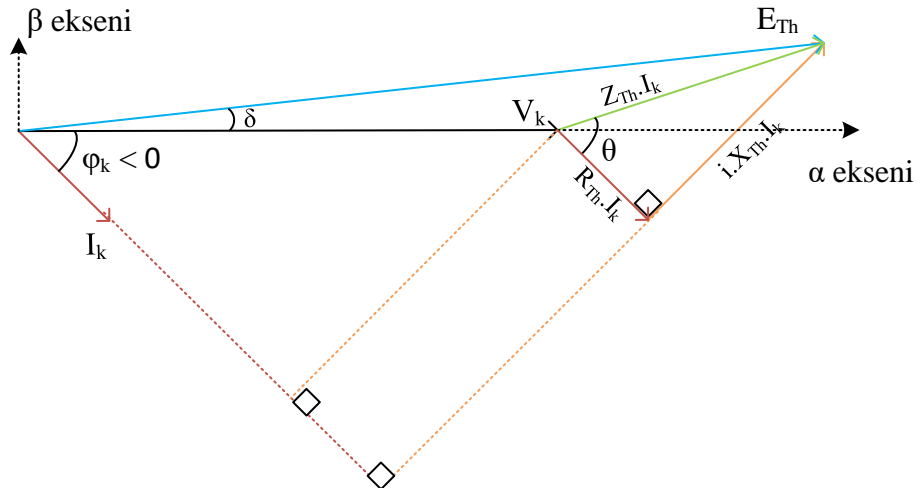
Şekil 3. Güç sistemi ve Thevenin eşdeğer devresi

Figure 3. Power system and Thevenin equivalent circuit

Şekil 3’de verilen Thevenin eşdeğerine ait Kirchhoff çevre denklemi yazılırsa;

$$E_{Th} \angle \delta = V_k + I_k \angle \varphi \cdot (R_{Th} + jX_{Th}) \quad (12)$$

Denklem 12 elde edilir. Denklem 12 ‘ye ait fazör diyagramı Şekil 4’te verilmiştir.



Şekil 4. Thevenin Eşdeğer Devresi Fazör diyagramı

Figure 4. Thevenin Equivalent Circuit Phasor Diagram

Şekil 4’te verilen fazör diyagramından Thevenin geriliminin (E_{Th}) α ve β eksenlerine iz düşümleri yazılırsa;

$$V_k + I_k \cdot R_{Th} \cdot \cos(\varphi_k) + I_k \cdot X_{Th} \cdot \sin(\varphi_k) - E_\alpha = 0 \quad (13)$$

$$I_k \cdot X_{Th} \cdot \cos(\varphi_k) - I_k \cdot R_{Th} \cdot \sin(\varphi_k) - E_\beta = 0 \quad (14)$$

Denklem 13 ve Denklem 14 elde edilir. Elde edilen denklemlerde E_α , E_β , R_{Th} ve X_{Th} bilinmeyenler olup, iki denklem ile dört bilinmeyenlerin hesaplanması mümkün değildir. Çözüm için k. baradan ardışık iki ölçüm yapılarak aşağıda verilen denklem sistemi elde edilir.

$$\begin{aligned} V_{k1} + I_{k1} \cdot R_{Th} \cdot \cos(\varphi_{k1}) + I_{k1} \cdot X_{Th} \cdot \sin(\varphi_{k1}) - E_\alpha &= 0 \\ I_{k1} \cdot X_{Th} \cdot \cos(\varphi_{k1}) - I_{k1} \cdot R_{Th} \cdot \sin(\varphi_{k1}) - E_\beta &= 0 \\ V_{k2} + I_{k2} \cdot R_{Th} \cdot \cos(\varphi_{k2}) + I_{k2} \cdot X_{Th} \cdot \sin(\varphi_{k2}) - E_\alpha &= 0 \\ I_{k2} \cdot X_{Th} \cdot \cos(\varphi_{k2}) - I_{k1} \cdot R_{Th} \cdot \sin(\varphi_{k2}) - E_\beta &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

Denklem 15 ‘teki bilinmeyenleri hesaplamak için matris formunda yazılırsa Denklem 16 elde edilir;

$$\begin{bmatrix} -I_1 \cos(\varphi_1) & I_1 \sin(\varphi_1) & 1 & 0 \\ -I_2 \cos(\varphi_2) & I_2 \sin(\varphi_2) & 1 & 0 \\ -I_1 \sin(\varphi_1) & -I_1 \cos(\varphi_1) & 0 & 1 \\ -I_2 \sin(\varphi_2) & -I_2 \cos(\varphi_2) & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_{Th} \\ X_{Th} \\ E_\alpha \\ E_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Denklem 16 ters matris yöntemi kullanılarak çözümlerse, bilinmeyen vektörü hesaplanır.

$$A \cdot x = b \quad ; \quad x = A^{-1} \cdot b \quad (17)$$

Denklem 17 ile hesaplanan parametreler kullanılarak Thevenin eşdeğer devresi parametreleri aşağıdaki denklemler yardımı ile hesaplanır.

$$E_{Th} = \sqrt{E_\alpha^2 + E_\beta^2} \quad ; \quad \delta = \text{atan}\left(\frac{E_\alpha}{E_\beta}\right) \quad (18)$$

$$Z_{Th} = \sqrt{R_{Th}^2 + X_{Th}^2} \quad ; \quad \theta = \text{atan}\left(\frac{X_{Th}}{R_{Th}}\right) \quad (19)$$

Denklem 16 verilen matrisin hesaplanması neticesinde elde edilen E_{Th} değerinin gerçek değerine çok yakın olarak hesaplandığı fakat Z_{Th} değerinin gerçek değerden uzaklaştığı görülmüştür (Demircioğlu, 2006). Bu nedenle Z_{Th} değerini doğru elde edebilmek için ilave denklemlere ihtiyaç vardır. Şekil 4'de verilen fazör diyagramı yardımıyla E_{Th} denklemi yazılırsa;

$$E_{Th} = \sqrt{(V_k \cdot \cos(\varphi_k) + I_k \cdot Z_{Th} \cdot \cos(\theta))^2 + (V_k \cdot \sin(\varphi_k) + I_k \cdot Z_{Th} \cdot \sin(\theta))^2} \quad (20)$$

Denklem 20 elde edilir. Denklem 20'de bilinmeyen Z_{Th} ve θ 'dır. Dağıtım sistemlerinde hatların X/R oranı 1'den küçüktür (Alizadeh ve diğ., 2016; Tonso ve diğ., 2005). Bu çalışmada X/R oranı 1'den küçük alınmıştır. Dağıtım sistemleri için θ değeri 1' den küçük alındıktan sonra Denklem 20'de tek bilinmeyen Z_{Th} kalır. Denklem 20 'nin çözümünden elde edilen pozitif kök Z_{Th} 'ı verir. Denklem 16'yı kullanarak maksimum %1 hata ile elde edilen E_{Th} Denklem 20'de yerine koyulduğunda gerçek Z_{Th} değeri bulunur (Demircioğlu, 2006).

$$Z_{Th} = \frac{\sqrt{4 \cdot E_{Th}^2 - 2 \cdot V_k^2 + 2 \cdot V_k^2 \cdot \cos(2\varphi_k - 2\theta) - 2 \cdot V_k \cdot \cos(\varphi_k - \theta)}}{2 \cdot I_k} \quad (21)$$

İlgili baradan görülen δ açısı, Denklem 22 kullanılarak hesaplanır.

$$\delta = \text{acos}\left(\frac{E_{Th}^2 - I_k^2 \cdot Z_{Th}^2 + V_k^2}{2 \cdot E_{Th} \cdot V_k}\right) \quad (22)$$

Thevenin eşdeğer devresine dair bilinmeyenler hesaplandıktan sonra, maksimum güç teoremi yardımı ile baradan çekilebilecek maksimum güç hesaplanabilir. Yükün empedansı ($Z_{Yük}$), Thevenin empedansına (Z_{Th}) eşit olduğunda, ilgili baradan maksimum güç çekilir maksimum gücün çekildiği esnada ilgili baranın gerilim ve akım değerleri kritik sınır değerleridir. Kritik anda bara gerilimi (Sun, Zhou, and Li 2005);

$$V_{k,cr} = \frac{E_{Th}}{2 \cos \delta} \quad (23)$$

Denklem 23 ile hesaplanan kritik gerilim ve bara gerilimi kullanılarak baraya ait gerilim kararlılık indeksi gerilim kararlılık indeksi (Modarresi ve diğ., 2016)) VSM_V Denklem 24 kullanılarak hesaplanabilir.

$$VSM_V = \frac{V_k - V_{k,kr}}{V_{k,kr}} \quad (24)$$

Kısıtlar (Constraints)

Optimizasyon çözülürken amaç fonksiyonunun hesaplanması için güç akışı yapılması gerekmektedir. Bu yüzden güç akışı denklemleri optimizasyon problemine eşitlik kısıtı olarak eklenmelidir. Aktif ve reaktif güç akışı denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\Delta P_i = P_{Gi} - P_{Li} - V_i \sum_{j=0}^{N_b} V_j (\cos \theta_{ij} G_{ij} + \sin \theta_{ij} B_{ij}) = 0 \quad (25)$$

$$\Delta Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li} - V_i \sum_{j=0}^{N_b} V_j (\sin \theta_{ij} G_{ij} - \cos \theta_{ij} B_{ij}) = 0 \quad (26)$$

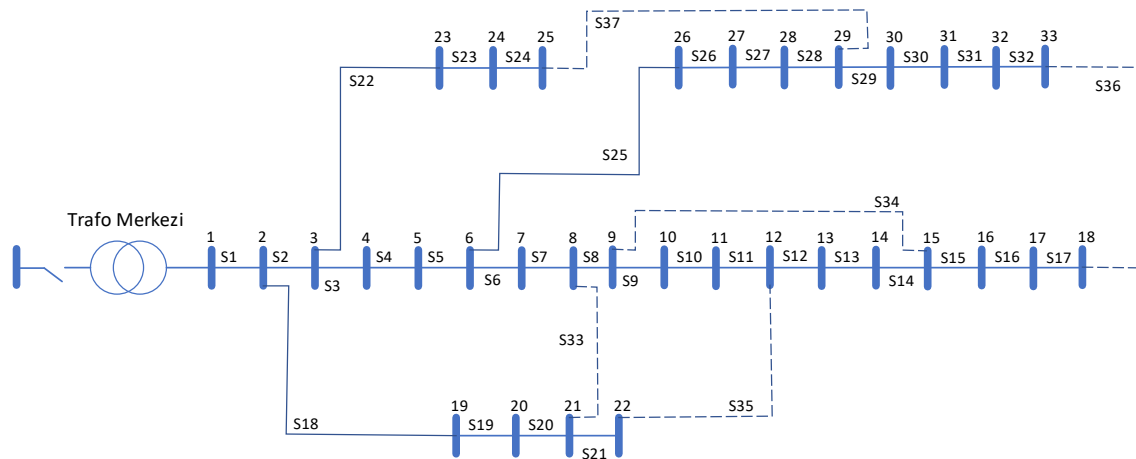
Burada i . baradaki yükün aktif ve reaktif güç değerleri P_{Li} ve Q_{Li} 'dir. P_{Gi} ve Q_{Gi} ise i . baradaki aktif ve reaktif güç üretim değerleridir. G_{ij} and B_{ij} ise admitans matrisi Y_{ij}' nin reel ve imajiner kısımlarıdır.

Optimizasyon probleminin çözümünde kısıt olarak bara gerilim değerlerinin belirlenen aralıklarda kalması ve dağıtım sistemine eklenecek yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam gücünün mevcut yüklerden küçük olması amaçlanmıştır. Denklem 27 ve 28' de eşitsizlik kısıtları verilmiştir.

$$V_{Min} \leq V_i \leq V_{Maks} \quad (27)$$

$$\sum P_{DÜ} \leq \sum P_{Yük} \quad (28)$$

V_{Min} 0.95 pu ve V_{Maks} 1.05 pu olarak alınmıştır. $P_{DÜ}$ sisteme eklenecek yenilenebilir enerji kaynaklarının kapasitesini, $P_{Yük}$ sistemin yüklerinin kapasitesini simgelemektedir.



Şekil 5. IEEE 33 baralı dağıtım sistemi

Figure 5. IEEE 33 bus distribution system

BENZETİM ÇALIŞMASI (SIMULATION STUDY)

Bu çalışmada önerilen yaklaşım IEEE 33 baralı dağıtım test sisteminde üzerinde uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar farklı optimizasyon tekniği ve farklı gerilim kararlılık indeksi kullanılarak yapılan çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5'te IEEE 33 baralı test sistemine ait tüm hatlar görülmektedir. Kesikli çizgi ile gösterilen hatlar dağıtım sistemindeki yedek hatları (devrede olmayan) göstermektedir.

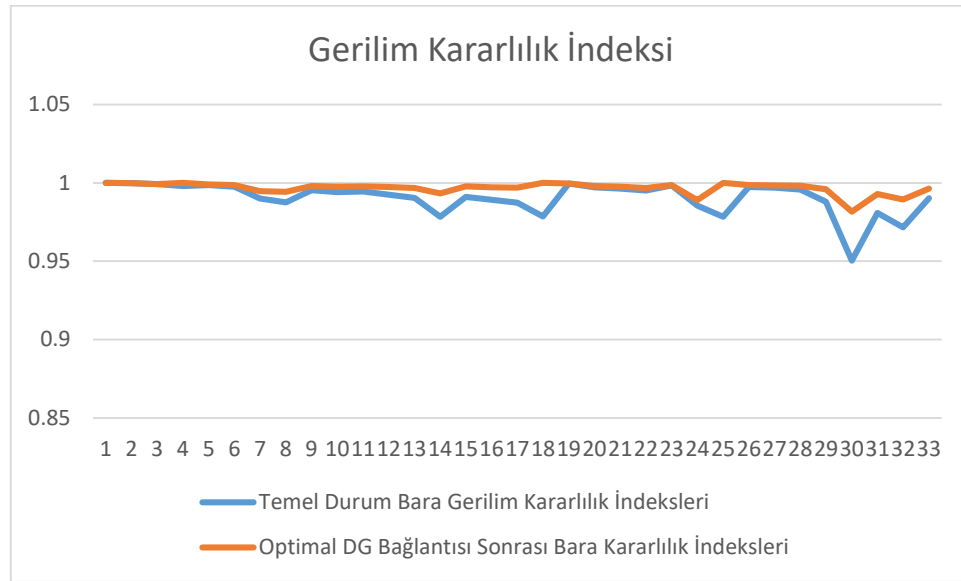
Önerilen yaklaşım ile IEEE 33 baralı dağıtım sisteminin yeniden yapılandırma ve yeni eklenecek dağıtık üretim (DÜ) tesislerinin boyut ve bağlantı noktalarının belirlenmesi problemleri aynı anda çözülmüş ve sonuçları diğer yöntemler ile karşılaştırılmıştır. Bazı dağıtım sistemleri için DÜ kapasitesi ve sayısının aktif güç kaybı ve gerilim profili üzerindeki etkisi araştırılmış (Rao 2013; Imran 2018). IEEE 33 baralı test sistemi için ekonomik açıdan da incelenerek 3 adet DÜ kullanmanın optimal güç kaybına yakın sonuç verdiği belirtilmiştir (Mahmoud 2017; Imran 2018). DÜ sayısı Çizelge 1'de karşılaştırma yapılan çalışmalarda da olduğu gibi 3 olarak belirlenmiştir. Çizelge 1'de optimizasyon öncesi durum, önerilen yaklaşım ve karşılaştırılan yöntem sonuçları verilmiştir.

Çizelge 1. Yeniden yapılandırma için karşılaştırmalı sonuçlar

Table 1. Comparative results for reconfiguration

Yöntem	Açık Anahtarlar	Bara/DÜ (MW)	Kayıp			Amaç fonksiyonu
			Güç (kW)	V _{Min} (pu)	V _{Maks} (pu)	
Optimizasyon Öncesi Durum	s33,s34,s35 s36,s37	-	203	0,913	1,0	-
FWA(Fireworks Algorithm) (Imran ve diğ., 2014)	s7, s11, s14, s28, s32	18/0,5315 29/0,6158 32/0,5367	66,89	0,971	1,0	1- Aktif kayıp minimizasyonu 2- Bara gerilimlerinin iyileştirilmesi 3- Voltage Stability Index (VSI) maksimizasyonu
UVDA (Bayat, Bagheri, and Noroozian 2016)	s7, s10, s13, s27, s32	15/0,649 21/0,486 29/1,554	57,28	0,976	1,0	1- Aktif kayıp minimizasyonu 2- Bara gerilimlerinin iyileştirilmesi 3- Voltage Stability Index (VSI) maksimizasyonu
Önerilen Yaklaşım	s14, s20, s21, s28, s32	4/0,833 8/1,236 31/1,071	47,5	0,984	1,0	1- Aktif kayıp minimizasyonu 2- Bara gerilimlerinin iyileştirilmesi 3- Thevenin Temelli indeks (VSM _v)maksimizasyonu

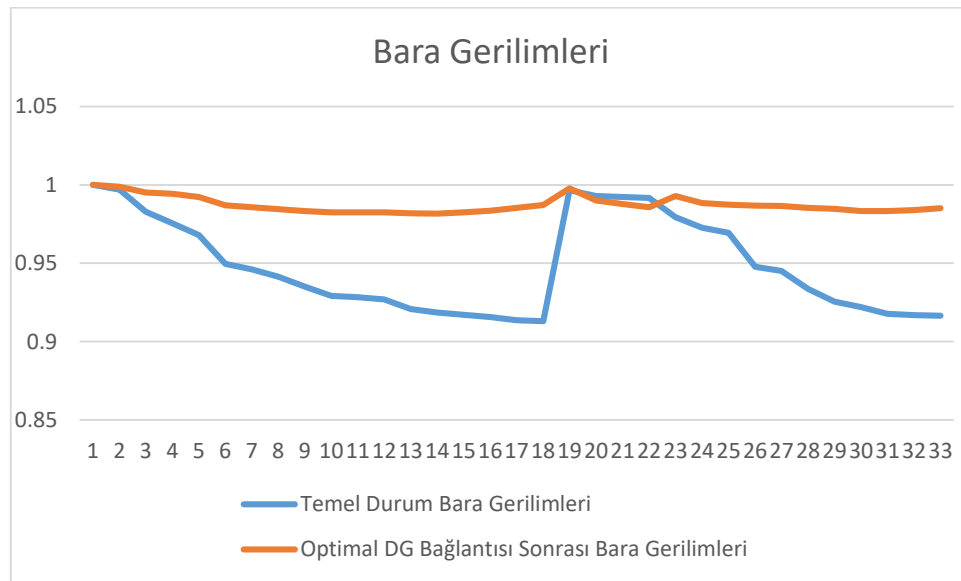
Çizelge 1'de optimizasyon öncesi durumdaki kayıplar 203 kW'tan önerilen yaklaşımın uygulanması ile 47,5 kW a düşerek %76,6 oranında azalmıştır. Ayrıca en düşük bara gerilim değeri 0,913 pu'dan 0,984 pu değerine yükselmiştir. Önerilen yaklaşımın Çizelge 1'de verilen diğer yaklaşımlara göre daha iyi sonuç verdiği, hem güç kaybı hem de gerilim seviyesinden görülmektedir.



Şekil 6. Temel durum ve önerilen yaklaşım sonrası bara gerilim kararlılık indeks değerleri

Figure 6. Bus voltage stability index values for base case and proposed method

Şekil 6'da önerilen yaklaşım uygulandıktan sonra sistem baralarına ait gerilim kararlılık indeks değerleri verilmiştir. Sistem baralarına ait gerilim kararlılık indeks değerleri 1'e yaklaştıkça sistemin kararlı olduğunu göstermektedir. Önerilen yaklaşımın uygulanması ile sistemin kararlılığının arttığı görülmektedir.

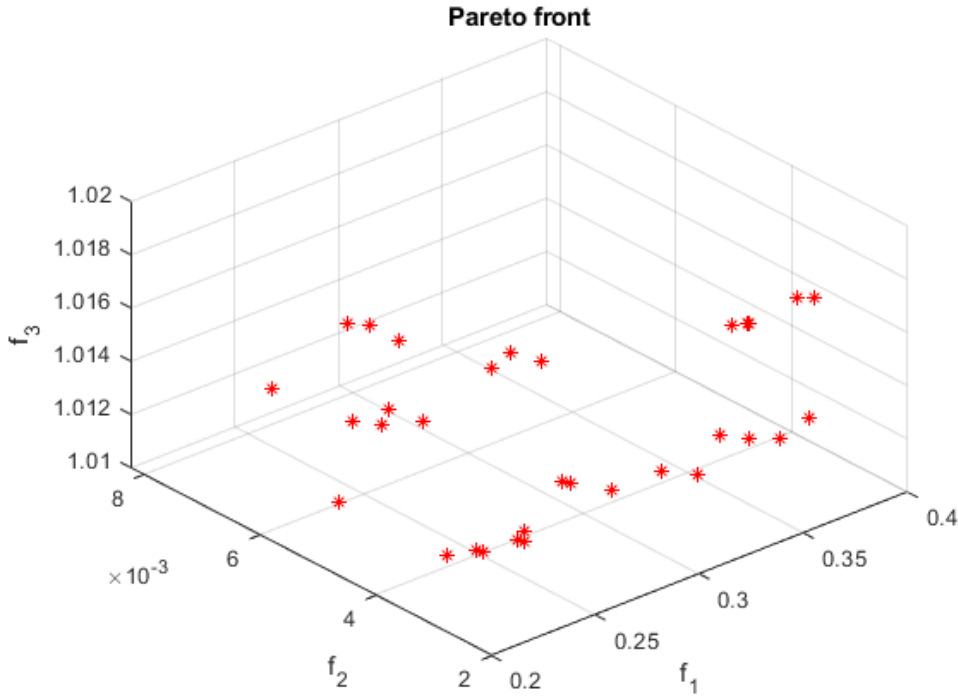


Şekil 7. Optimizasyon öncesi ve sonrası bara gerilim değerleri

Figure 7. Bus voltage profile for base case and proposed method

Şekil 7'de optimizasyon öncesi ve sonrasına ait bara gerilim değerleri verilmiştir. Optimizasyon sonrası bara gerilim değerlerinin 1 pu 'e yaklaştığı ve optimizasyon öncesi duruma göre gerilim dalgalanmalarının azaldığı ve limitler içinde olduğu görülmektedir.

Her amaç fonksiyonunun ağırlığı karşılaştırma yapılan çalışmalarda olduğu gibi aynı ve bir olarak alınmıştır. Eşit ve bir olan ağırlık değerleri ile elde edilen üç amaç fonksiyonunun pareto çözümleri Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Pareto front grafiği
Figure 8. Pareto front Graph

SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada dağıtım sistemlerinin yeniden yapılandırması, DÜ tesislerin optimal yerleşimi ve boyutlandırılması problemi aynı anda ele alınarak SMO algoritması kullanılarak çözülmüştür. Önerilen yaklaşımın dağıtım sisteminin güç kayıplarını ve bara gerilim dalgalanmalarını azalttığı görülmüştür. Ayrıca önerilen yaklaşımda Thevenin temelli kararlılık indeksi kullanılarak farklı kararlılık indeksi kullanan yaklaşımlara göre dağıtım sisteminin daha kararlı çalışması sağlanmıştır. Dağıtım sistemi bara gerilim değerlerinin optimizasyon öncesi duruma göre daha yüksek değerler aldığı benzetim çalışması sonucunda görülmüştür.

Bu çalışmada kullanılan DÜ tesislerinin güç faktörü 1 alınmıştır. Çalışmanın sonraki aşamalarında farklı güç faktörüne sahip DÜ tesisleri ve farklı optimizasyon teknikleri kullanılarak problemin çözülmesi ve sonuçlarının değerlendirilmesi amaçlanmaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Abdelkader, Mohamed A., Zeinab H. Osman, and Mostafa A. Elshahed. 2021. "New Analytical Approach for Simultaneous Feeder Reconfiguration and DG Hosting Allocation in Radial Distribution Networks." *Ain Shams Engineering Journal* 12(2): 1823–37. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.09.024>.
- Abid, Md Shadman, Hasan Jamil Apon, Ashik Ahmed, and Khandaker Adil Morshed. 2022. "Chaotic Slime Mould Optimization Algorithm for Optimal Load-Shedding in Distribution System." *Ain Shams Engineering Journal* 13(4): 101659. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.101659>.
- Alizadeh, Seyed Morteza, Cagil Ozansoy, and Tansu Alpcan. 2016. "The Impact of X/R Ratio on Voltage Stability in a Distribution Network Penetrated by Wind Farms." *Proceedings of the 2016 Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC 2016*.
- Arun, M., and P. Aravindhababu. 2009. "A New Reconfiguration Scheme for Voltage Stability Enhancement of Radial Distribution Systems." *Energy Conversion and Management* 50(9): 2148–51.

- <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2009.04.022>.
- Bayat, A., A. Bagheri, and R. Noroozian. 2016. "Optimal Siting and Sizing of Distributed Generation Accompanied by Reconfiguration of Distribution Networks for Maximum Loss Reduction by Using a New UVDA-Based Heuristic Method." *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 77: 360–71. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.11.039>.
- Demircioğlu, S., 2006, *Enerji Sistemlerinde Gerilim Kararlılığı Sınırlarının Yerel Bara Parametreleri Kullanılarak Gerçek Zamanlı Değerlendirilmesi*, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya
- Georgilakis, Pavlos S., and Nikos D. Hatziargyriou. 2013. "Optimal Distributed Generation Placement in Power Distribution Networks: Models, Methods, and Future Research." *IEEE Transactions on Power Systems* 28(3): 3420–28.
- Hashmi, Md Umar, Rahul Choudhary, and Jayesh G. Priolkar. 2015. "Online Thevenin Equivalent Parameter Estimation Using Nonlinear and Linear Recursive Least Square Algorithm." *Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies, ICECCT 2015* (July).
- Imran Ahmad Quadri, S. Bhowmick, D. Joshi. 2018 "A comprehensive technique for optimal allocation of distributed energy resources in radial distribution systems." *Applied Energy*, 211; 1245-1260.
- Khodr, H M, J. Martinez-Crespo, M A Matos, and J Pereira. 2009. "Distribution Systems Reconfiguration Based on OPF Using Benders Decomposition." *IEEE Transactions on Power Delivery* 24(4): 2166–76. <http://ieeexplore.ieee.org/document/5235762/>.
- Li Shimin, Huiling Chen, Mingjing Wang, Ali Asghar Heidari, Seyedali Mirjalili. 2020. "Slime Mould Algorithm: A New Method for Stochastic Optimization." *Future Generation Computer Systems* 111: 300–323.
- Mahdavi, Meisam, Hassan Haes Alhelou, Nikos D. Hatziargyriou, and Francisco Jurado. 2021. "Reconfiguration of Electric Power Distribution Systems: Comprehensive Review and Classification." *IEEE Access* 9: 118502–27.
- Mahmoud Pesaran H.A, Phung Dang Huy, Vigna K. Ramachandramurthy. 2017. "A review of the optimal allocation of distributed generation: Objectives, constraints, methods, and algorithms." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75: 293-312
- McDermott, T. E., I. Drezga, and R. P. Broadwater. 1999. "A Heuristic Nonlinear Constructive Method for Distribution System Reconfiguration." *IEEE Transactions on Power Systems* 14(2): 478–83.
- Mishra, Sivkumar, Debapriya Das, and Subrata Paul. 2017. "A Comprehensive Review on Power Distribution Network Reconfiguration." *Energy Systems* 8(2): 227–84.
- Modarresi, Javad, Eskandar Gholipour, and Amin Khodabakhshian. 2016. "A Comprehensive Review of the Voltage Stability Indices." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 63: 1–12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.010>.
- Mohamed Imran, A., M. Kowsalya, and D. P. Kothari. 2014. "A Novel Integration Technique for Optimal Network Reconfiguration and Distributed Generation Placement in Power Distribution Networks." *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 63: 461–72. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.06.011>.
- Nakagaki, Toshiyuki, Hiroyasu Yamada, and Tetsuo Ueda. 2000. "Interaction between Cell Shape and Contraction Pattern in the Physarum Plasmodium." *Biophysical Chemistry* 84(3).
- Nguyen, Thuan Thanh, and Anh Viet Truong. 2015. "Distribution Network Reconfiguration for Power Loss Minimization and Voltage Profile Improvement Using Cuckoo Search Algorithm." *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 68: 233–42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.12.075>.
- Ranjan, R., B. Venkatesh, and D. Das. 2003. "Voltage Stability Analysis of Radial Distribution Networks." *Electric Power Components and Systems* 31(5): 501–11.
- O. Aliman, I. Musirin, M. M. Othman and M. H. Sulaiman, "Heuristic based placement technique for distributed generation," 2011 5th International Power Engineering and Optimization Conference, 2011, pp. 83-87, doi: 10.1109/PEOCO.2011.5970454.
- Rao R. S., Ravindra, K., K. Satish and Narasimham, S. V. L., 2013. "Power Loss Minimization in

- Distribution System Using Network Reconfiguration in the Presence of Distributed Generation," *IEEE Transactions on Power Systems* 28(1): 317-325. doi: 10.1109/TPWRS.2012.2197227.
- Rawat, Mahiraj Singh, and Shelly Vadhera. 2019. "Heuristic Optimization Techniques for Voltage Stability Enhancement of Radial Distribution Network with Simultaneous Consideration of Network Reconfiguration and DG Sizing and Allocations." *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences* 27(1): 330-45.
- Sun, Huadong, Xiaoxin Zhou, and Ruomei Li. 2005. "Accuracy Analysis of Static Voltage Stability Indices Based on Power Flow Model." *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference* 2005: 1-7.
- Syahputra, Ramadoni, Indah Soesanti, and Mochamad Ashari. 2016. "Performance Enhancement of Distribution Network with Dg Integration Using Modified PSO Algorithm." *Journal of Electrical Systems* 12(1): 1-19.
- Tobón V., Jorge Esteban, Rosa E Correa Gutiérrez, and Juan M. Ramirez. 2014. "27-Voltage Collapse Detection Based on Local Measurements." *Electric Power Systems Research* 107: 77-84. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2013.09.013>.
- Tonso, Matteo, Johan Morren, Sjoerd W.H. De Haan, and J. A. Ferreira. 2005. "Variable Inductor for Voltage Control in Distribution Networks." *2005 European Conference on Power Electronics and Applications* 2005.
- Vu, Khoi, M.M. Begovic, D. Novosel, and M.M. Saha. 1999. "Use of Local Measurements to Estimate Voltage-Stability Margin." *IEEE Transactions on Power Systems* 14(3): 1029-35. <http://ieeexplore.ieee.org/document/780916/>.
- Yuan, Haoyu, and Fangxing Li. 2014. "A Comparative Study of Measurement-Based Thevenin Equivalents Identification Methods." *2014 North American Power Symposium, NAPS 2014*
- Y. Li and X. Chang, "A MST-based and new GA supported distribution network planning," 2011 International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC), 2011, pp. 2534-2538, doi: 10.1109/MEC.2011.6026009.



PERFORMANCE ANALYSIS OF A THERMOSIPHON CHARGED WITH DEIONIZED WATER/ ETHYLENE GLYCOL MIXTURE BASED GRAPHENE NANO PLATELET NANOFLUID

Kerim MARTIN

Kahramanmaraş İstiklal University, Elbistan Engineering Faculty, Energy Systems Engineering Department,
Kahramanmaraş, TURKIYE
kerim.martin@istiklal.edu.tr

Geliş/Received: 07.04.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 07.07.2022

ABSTRACT: The thermosiphons are wickless heat pipes which work under gravity force. Different working fluids like water, engine oil, ethylene glycol are used in this equipments. Nanofluids including various nano particles are also used in the thermosiphons. In this study, deionized water (DW)/ ethylene glycol (EG) mixture based graphene nano platelet (GNP) nanofluid was charged in a thermosiphon and thermal performance analysis was performed. The mixing rate of DW:EG was 95:5 while the particle concentration was 1 %. Triton X-100 was added to the mixture as surfactant. To specify the effect of GNP, a set of experiments for both DW+EG and DW+EG+GNP nanofluid were carried out at the same operating conditions. The results show that GNPs had a positive effect on the performance of the thermosiphon. The presence of GNP in the base fluid was decreased the thermal resistance while it was increased the thermal efficiency of the thermosiphon. The maximum efficiency value was reached as 57.1 % when the nanofluid used. At the same condition, the efficiency was 49.5 % when the working fluid was DW+EG mixture.

Keywords: Thermosiphon, Ethylene glycol, Graphene, Nanofluid, Efficiency

Deiyonize Su/ Etilen Glikol Karışımı Bazlı Grafen Nano Plaka İçeren Nanoakışkan ile Şarj Edilen Bir Termosifonun Performans Analizi

ÖZ: Termosifonlar yer çekimi altında çalışan fitilsiz ısı borularıdır. Bu ekipmanlarda su, motor yağı, etilen glikol gibi farklı çalışma akışkanları kullanılmaktadır. Termosifonlarda çeşitli nano parçacıklar içeren nano akışkanlar da kullanılmaktadır. Bu çalışmada, deiyonize su/etilen glikol karışımı bazlı grafen nano plaka içeren bir nano akışkan termosifona şarj edildi ve ısı performans analizi yapıldı. Deiyonize su/etilen glikol karıştırma oranı 95:5 iken partikül konsantrasyonu %1 idi. Karışıma yüzey aktif madde olarak Triton X-100 ilave edildi. Grafenin etkisini belirlemek için, aynı çalışma koşullarında hem DW+EG hem de DW+EG+GNP nanoakışkanı için bir dizi deney yapılmıştır. Sonuçlar grafenin termosifon performansı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Baz akışkanda grafen bulunması, termosifonun ısı verimini artırırken ısı direncini azaltmıştır. Nanoakışkan kullanıldığında maksimum verim değerine % 57.1 olarak ulaşılmıştır. Aynı durumda, çalışma akışkanı DW+EG karışımı olduğunda verim % 49.5 olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Termosifon, Etilen Glikol, Grafen, Nano akışkan, Verimlilik

1. INTRODUCTION

Improving of nano technology in last decades has come up with different types of nano particles which have various usage areas like food processing and packing, coatings, drug delivery, adsorption, photocatalytic and thermal processes (Ghorabae et al., 2021). Nanofluids which were first mentioned in

1995 by Choi and Eastman (Choi & Eastman, 1995) are the suspension of nano particles and some base fluids. The nanofluids have unique thermal properties while the base fluids don't have. Two main techniques are widely used in preparing of nanofluids in literature. One of them is "one step method" and the other is "two step method" which was mostly preferred. In one step method, nano particles and nanofluid were simultaneously produced. In two step method, nano particles are produced first. Then nano particles are added to base fluid (Ghorabae et al., 2021).

Different types of base fluids such as ethylene glycol, water, engine oil and different nano particles such as graphene, metals, carbon nanotubes, metal oxides were utilized in nanofluid preparation in literature. These nanofluids generally positively affected the thermal properties of base fluids. Some of the studies about nanofluids are listed in Table 1.

In general, there are some parameters which affect the thermal properties of a nanofluid such as nano particle, nanofluid concentration, base fluid, temperature and surfactant type (Ghorabae et al., 2021). Among these parameters, the base fluid and nano particle have the most important effect on the heat transfer performance of nanofluid. While the base fluid can be a single liquid or the mixture of more than one liquid, different nano particles can be used with these base fluids (Martin & Boran, 2021), (Filiz & Yetişken, 2021), (Sun et al., 2021), (Kakavandi & Akbari, 2018), (O. Soltani & Akbari, 2016), (Dong et al., 2022). In this experimental study Graphene Nano Platelet (GNP) was utilized as nano particle. The base fluid of the nanofluid was the mixture of deionised water (DW) and ethylene glycol (EG). DW: EG mixing rate was 95:5 by weight. Prepared nanofluid was performed in a thermosiphon heat pipe for different experimental conditions. Evaporation temperature of EG is higher than DW. Although the use of ethylene glycol and water in the thermosiphon is included in some studies in the literature, the use of graphene nanoplatelets with these two fluids mixing ratio of 95:5 is not included. This is the novelty of current study. The aim of this study is to investigate the working temperature range of the thermosiphon heat pipe in case of the presence of 5% EG in DW. It was also investigated how the presence of GNP in the DW-EG mixture affects the thermal performance of the heat pipe.

2. MATERIAL AND METHOD

GNPs having unique properties (i.e. thermal conductivity of 3000 W/mK and specific heat capacity of 1528 J/kgK), have a great potential of using in heat transfer applications. GNPs are also good at preparing nanofluids.

2.1. Nanofluid Preparation

The nanofluid whose nano particle and base fluid were GNP and DW-EG mixture respectively was utilized in a thermosiphon type heat pipe. DW-EG mixing rate was 95:5 by weight. Two step method was performed to prepare the nanofluid. Particle concentration was 1% by weight. The surfactant Triton X-100 with a concentration of 0.2 % by weight was added to the mixture to prevent agglomeration. The mixture was detained in an ultrasonic bath for 5 hours before the experiments. Therefore a more stable nanofluid could be obtained. Preparation steps of the nanofluid can be seen in figure 1.

Table 1. Summary of some studies about nanofluids prepared various base fluids and nano particles

Reseachers	Base Fluid	Nano Particle	Application	Results
Arif et al. (Arif et al., 2021)	Engine Oil	Molybdenum Disulphide and Graphene oxide	Oscillating Vertical Cylinder.	The heat transfer rate improved up to 23.17 %
Aberoumand and Jafarimoghaddam (Aberoumand & Jafarimoghaddam, 2017)	Engine Oil	Cu	Thermal Conductivity and Viscosity Analysis	Viscosity and thermal conductivity improvements of 37% and 49% were procured respectively.
Vasheghani et al. (Vasheghani et al., 2013)	Engine Oil	TiO ₂	Thermal Conductivity and Viscosity Analysis	Thermal conductivity and viscosity values increased about % 57 and % 8 respectively
Soltani et al. (F. Soltani et al., 2020)	Engine Oil	Tungsten Oxide and Multi Walled Carbon Nano Tube	Thermal Conductivity Analysis	The maximum increasing rate of thermal conductivity was procured as 19.85 %
Sundar et al. (Sundar et al., 2021)	Water	Nanodiamond	Plate Heat Exchanger	Heat transfer coefficient and Overall heat transfer coefficient enhanced up to 55.47% and 32.50 % respectively
Nfawa et al. (Nfawa et al., 2021)	Water	MgO and CuO	Thermal Conductivity Analysis	The maximum enhancement in thermal conductivity was reached as 16 %
Cruz et al. (Cruz et al., 2022)	Water	CuO	Shell and Tube Heat Exchanger	The biggest increasing rate in heat transfer was achieved as 48 %
Sözen et al. (Sözen et al., 2021)	Water	Graphene	Air-to-Air Heat Exchanger	The biggest enhancement value in thermal efficiency was reached as 87.7 %
Yashawantha and Vinod (Yashawantha & Vinod, 2021)	Ethylene Glycol and Water	CuO, Al ₂ O ₃ and TiO ₂	Thermal Conductivity Analysis	Thermal conductivity improvements of 3.59 %, 4.87% and 6.34 % was achieved
Aydın et al. (Aydın et al., 2020)	Ethylene Glycol	Dolomite	Heat Pipe	The thermal efficiency value was increased from 44% to 65% thanks to the nanofluid
Suganthi et al. (Suganthi et al., 2014)	Ethylene Glycol and Water	ZnO	Heat Transfer Performance Analysis	Thermal conductivity improvement of 33.4%
Sundar et al. (Sundar et al., 2013)	Ethylene Glycol and Water	CuO and Al ₂ O ₃	Thermal Conductivity Analysis	The maximum thermal conductivity enhancement was reached as 24.56 %

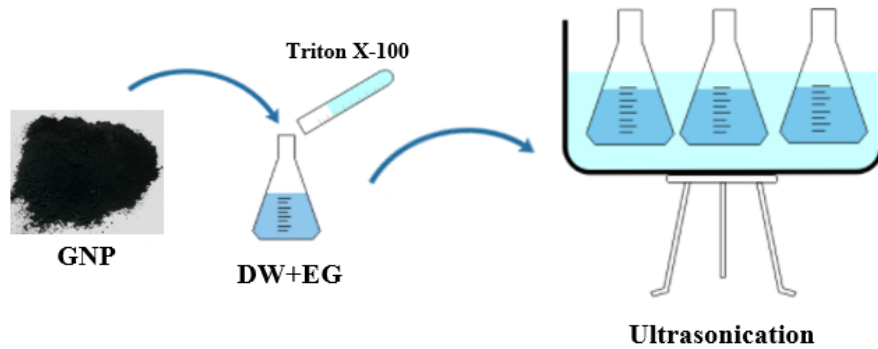


Figure 1. Nanofluid preparation steps

GNPs and Triton X-100 surfactant were procured from “Nanografi Company”. SEM image and particle size distribution of the GNPs were shown in figure 2 and figure 3 respectively. GNP is a 2D nano structure as can be seen in fig. 2. It can be understood from fig.3 (Blue line) that GNPs are thinner than 5 nm. Fig 3 also shows that the average particle size of the GNPs are 3 nm. Other properties of GNPs were as follows:

- Purity: 99.9%
- Surface Area: 800 m²/g
- Density: 2267 kg/m³

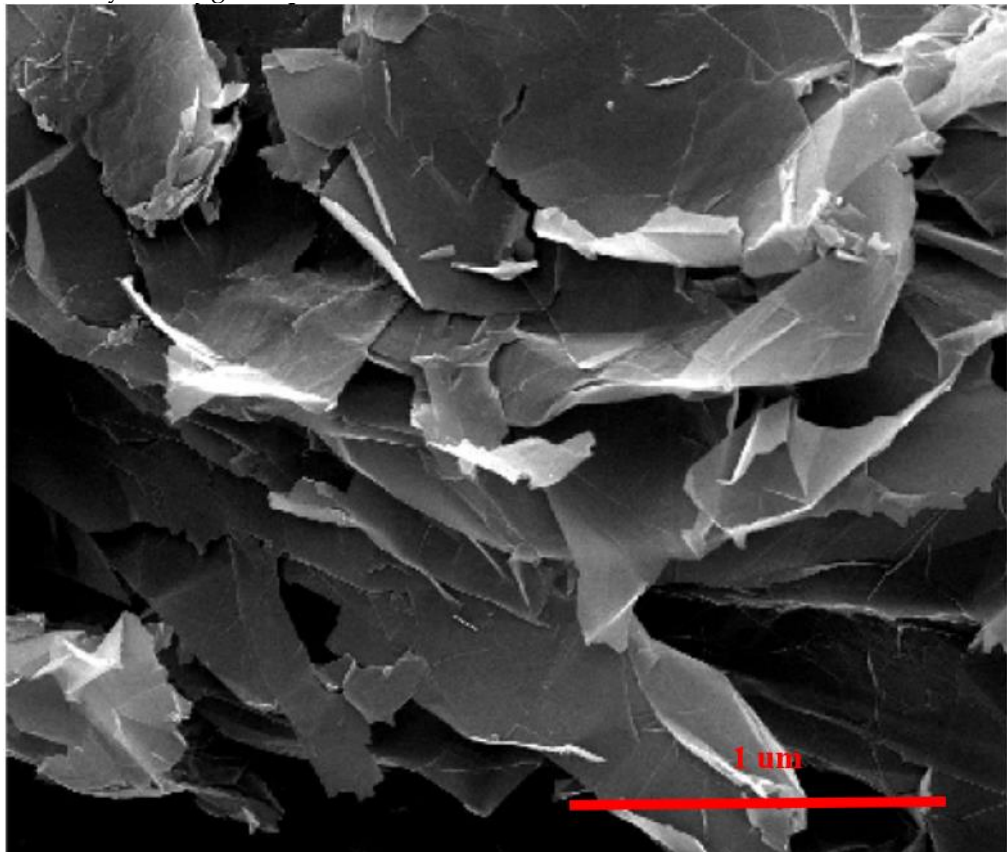


Figure 2. SEM image of GNPs

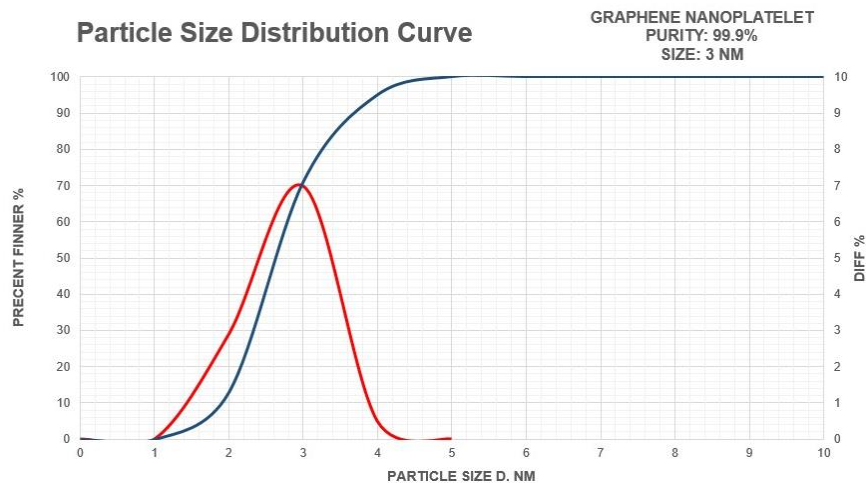


Figure 3. Particle size distribution of GNPs

2.2. Experimental Setup

Prepared nanofluid was charged to the thermosiphon which was made of copper. Its length and inner diameter were 1 m and 13 mm respectively. It consisted of 3 main part named as condenser, adiabatic and evaporator sections whose lengths were 400 mm, 200 mm and 400 mm respectively. The thermosiphon was well isolated by using glass wool to eliminate the heat losses. The evaporator section was heated by an electrical resistance while condenser section was cooled by water passing through the jacket around it. The wall temperatures of the thermosiphon were measured by the K-type thermocouples located in eight different point as seen in fig. 4. Besides, two more thermocouples were utilized to measure inlet and outlet temperatures of the cooling water.

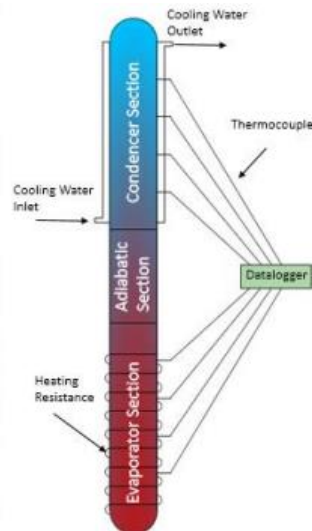


Figure 4. Schematic view of the thermosiphon

44.2 ml nanofluid, which was corresponded to 1/3 of the total volume of the thermosiphon, was charged into it. The experiments were performed with different heating powers (200 W, 300 W and 400 W) and flow rates (3 g/s, 6 g/s and 9 g/s) to see working range of the thermosiphon. Three working fluids (DW, DW+EG (95:5) and DW+EG+GNPs) were tried separately and the results were compared.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

Thermal efficiency, wall temperature distribution and thermal resistance can be considered as performance indicators of a thermosiphon. These parameters which were mostly affected by working fluid, cooling water mass flow rate and heating power were calculated as follow.

Thermal efficiency was calculated as the ratio of heat transfer rate in condenser to heating power changing from 200 W to 400 W.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}_e} \quad (1)$$

Here, \dot{Q}_c was the heat transfer rate in condenser section while \dot{Q}_e was the heating power supplied from the heating resistance in evaporator section. Thermosiphon was well isolated so heat transfer rate to the atmosphere was negligible. \dot{Q}_c was calculated by using equation 2.

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_{water} c_{p, water} \Delta T_{water} \quad (2)$$

The heat was transferred from thermosiphon wall surface to cooling water in condenser section. In eq.2, \dot{m}_{water} corresponded to mass flow rate of cooling water while $c_{p,water}$ and ΔT_{water} corresponded to specific heat capacity and temperature difference between inlet and outlet temperatures of cooling water respectively.

Average temperature difference between condenser and evaporator sections and thermal resistance of the thermosiphon were calculated using equation 3 and 4 respectively. In eq. 3, T_e values were the wall temperatures of evaporator section measured from 4 different point. Similarly, T_c values were the wall temperatures of condenser section measured from 4 different point. In eq. 4, R was the thermal resistance of the thermosiphon.

$$\Delta T = \left(\frac{T_{e1} + T_{e2} + T_{e3} + T_{e4}}{4} \right) - \left(\frac{T_{c1} + T_{c2} + T_{c3} + T_{c4}}{4} \right) \quad (3)$$

$$R = \frac{\Delta T}{\dot{Q}_e} \quad (4)$$

The tests were done for various working conditions for each working fluid (DW, DW+EG and DW+EG+GNP). The results were illustrated as graphics to see the effect of working fluid and test conditions to the performance of thermosiphon.

The temperature difference between evaporator and condenser sections specify the thermal resistance of thermosiphon (Eq. 4). Fig. 5, 6 and 7 show the wall temperature distribution along the thermosiphon at 200 W, 300 W and 400 W respectively. Here, the heat pipe length from 0 to 40 cm corresponded to evaporator section, 40 to 60 cm corresponded to adiabatic area and 60 to 100 cm corresponded to condenser section. Higher evaporator temperature means higher thermal resistance. It is wanted that the thermosiphon has low thermal resistance so it would have high efficiency value. When the graphs examined, it can be seen that the presence of EG in the DW increased the evaporation temperature of the fluid. This is because EG has a higher boiling temperature than DW. The aim of this study is to see the effected of GNPs in DW+EG base fluid. The temperature distribution of DW was added to the graph to show the difference of working temperature between DW and EG on thermosiphon. On the other hand, the presence of GNP in the DW+EG mixture decreased the evaporation temperature. It means that adding of GNPs to DW+EG mixture decreased the thermal resistance of thermosiphon and improved the thermal efficiency.

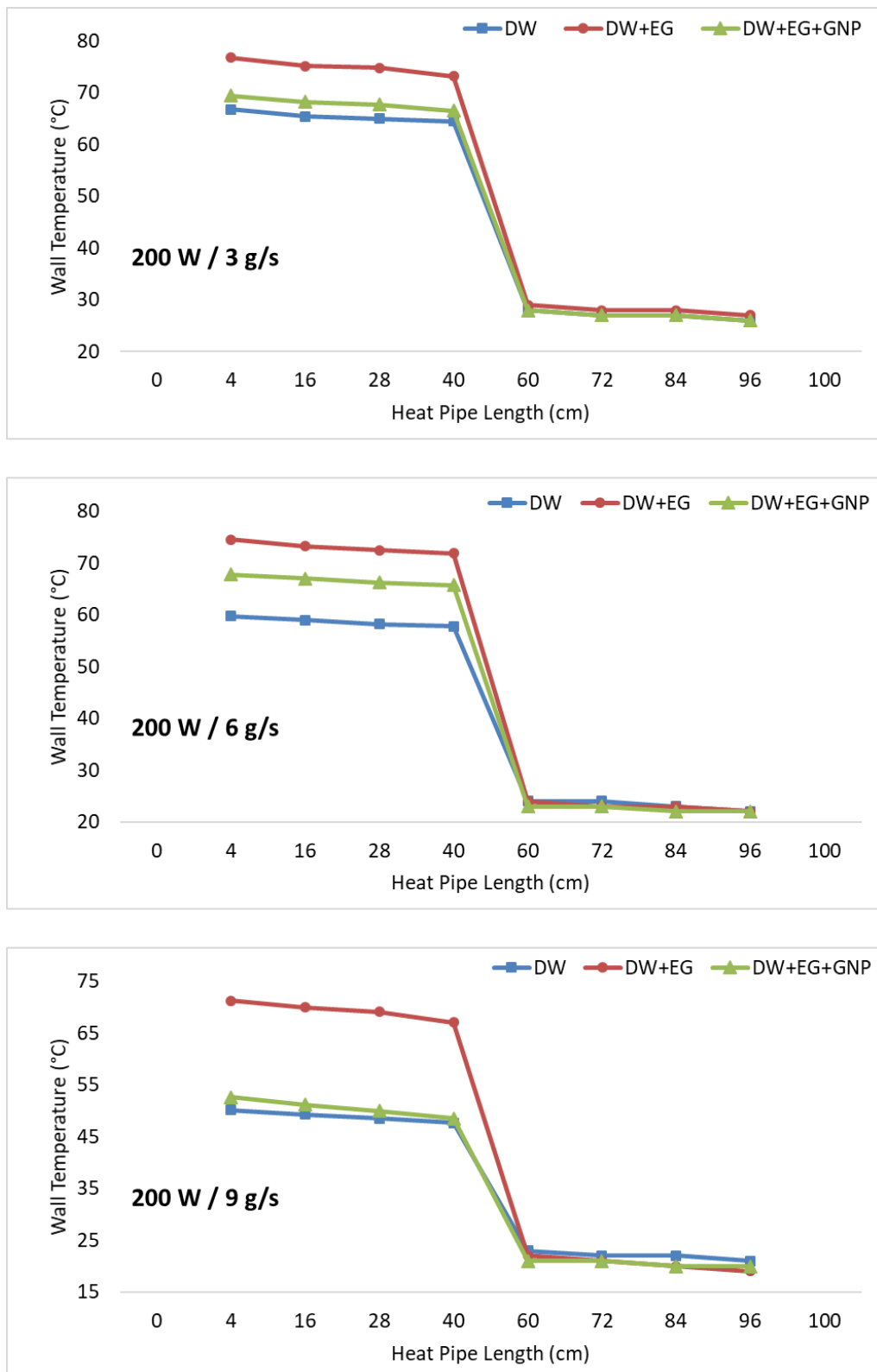


Figure 5. Wall temperature distribution of the thermosiphon under 200 W heating power

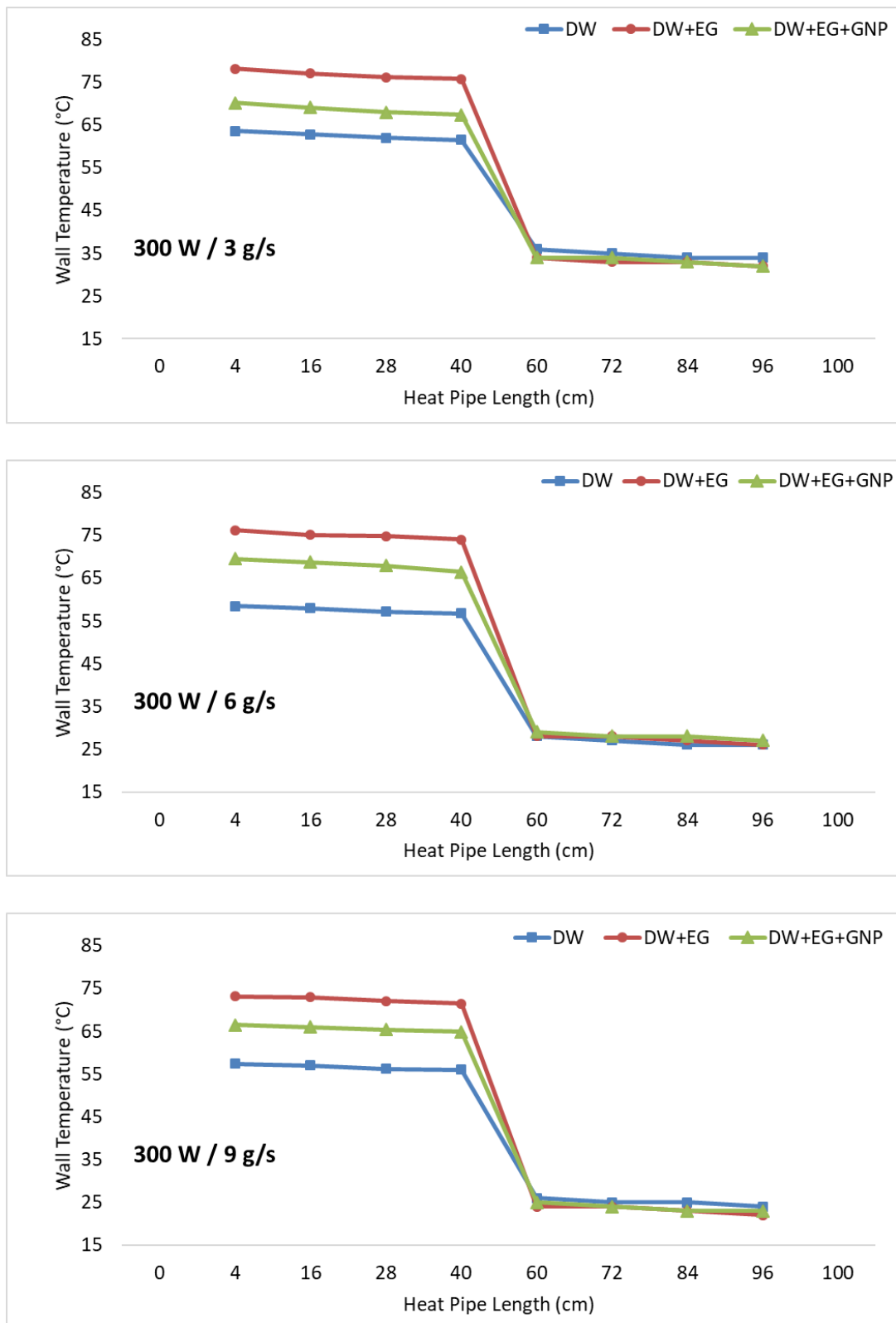


Figure 6. Wall temperature distribution of the thermosiphon under 300 W heating power

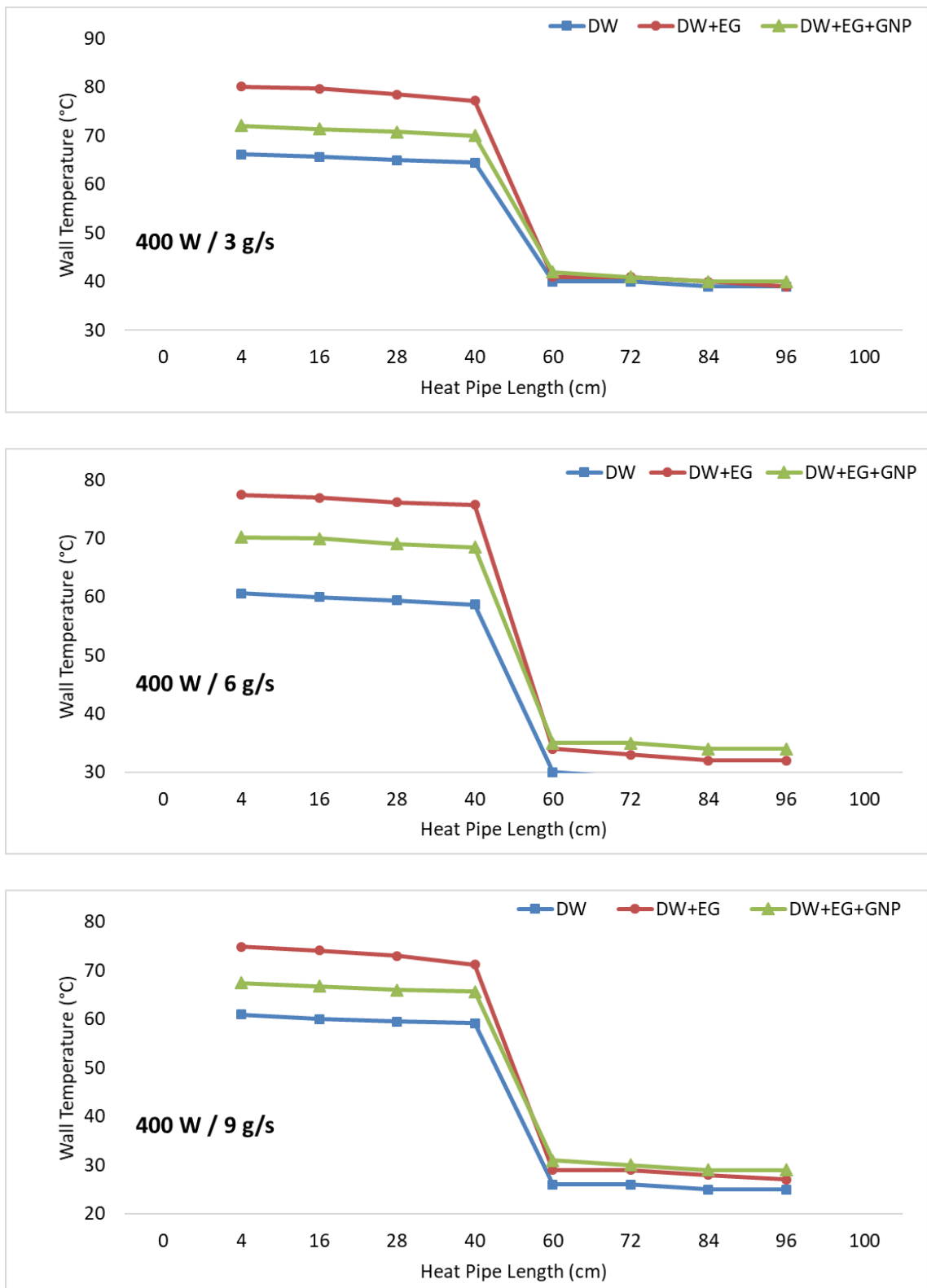


Figure 7. Wall temperature distribution of the thermosiphon under 400 W heating power

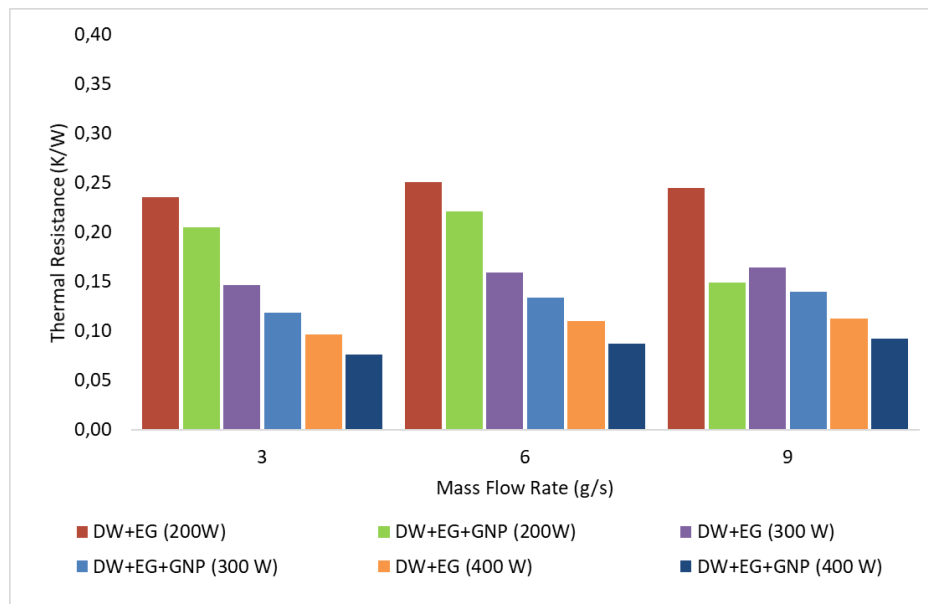


Figure 8. Thermal resistance values of thermosiphon in different mass flow rates

Thermal resistance of a thermosiphon directly affects the thermal performance of it. It is desirable that the heat pipe has low thermal resistance. The graphic in figure 8 shows the effect of working fluid on thermal resistance of thermosiphon at different heating powers and mass flow rates. When the graph analysed, it is seen that using of GNPs in base fluid decreased the thermal resistance value of thermosiphon for all heating powers and mass flow rates. For example when the heating power and mass flow rate were 200 W and 3 g/s respectively, thermal resistance was decreased from 0.24 K/W to 0.21 K/W by adding GNPs to DW+EG. The minimum thermal resistance value was reached as 0.076 K/W when the working fluid was DW+EG+GNP nanofluid at the conditions of 400 W heating power, 3 g/s mass flow rate. At the same mass flow rate, increasing of heating power value decreased the thermal resistance for each working fluid. For instance, when the working fluid and mas flow rate were DW and 6 g/s respectively, while heating power increased from 200 W to 400 W, the thermal resistance values decreased from 0.25 K/W, 0.11 K/W.

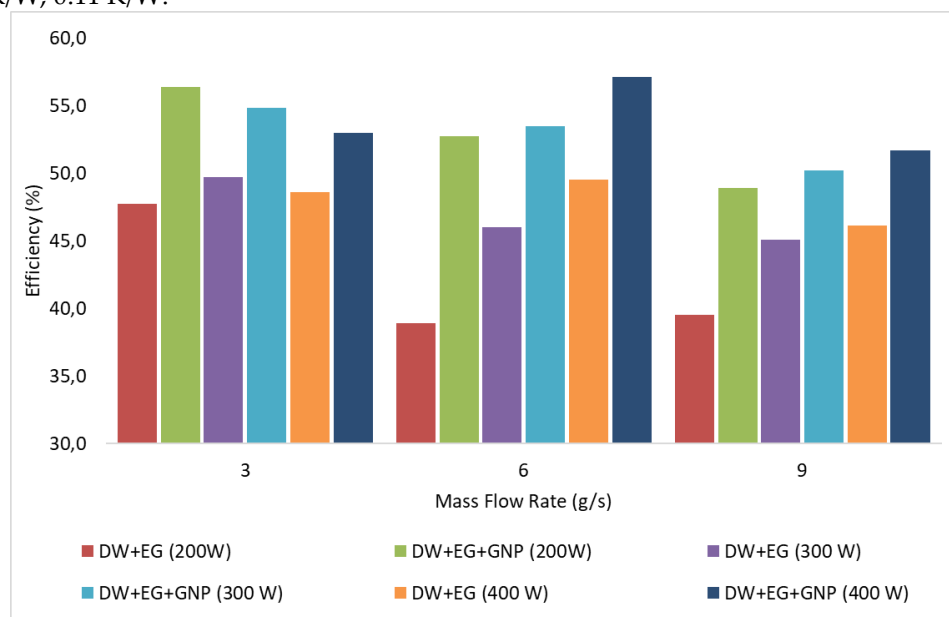


Figure 9. Thermal efficiency values of thermosiphon in different mass flow rates

The presence of GNPs in DW+EG mixture had a positive effect on efficiency of the thermosiphon for all experimental conditions as seen in fig. 9. For example, in the experiments which DW+EG+GNP nanofluid used and the mass flow rate was 3 g/s, maximum efficiency values were 56.4 %, 54.8 % and 53 % at the heating powers of 200 W, 300 W and 400 W respectively. The maximum efficiency value was reached as 57.1 % when the working fluid, heating power and mass flow rate were GNP+DE+EG, 400 W and 6 g/s respectively. The best improvement rate in efficiency was achieved as 35.5 % in condition of mass flow rate of 6 g/s and heating power of 200 W. Besides, increasing of the mass flow rate from 3 to 9 had a negative effect on the efficiency values for almost all working fluids and heating powers. The minimum efficiency values were reached in the mass flow rate of 9 g/s.

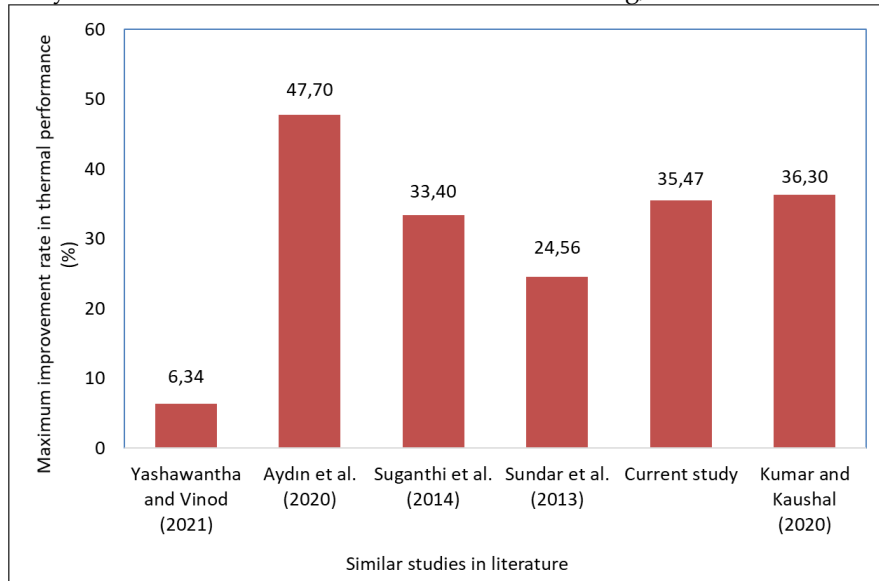


Figure 10. Comparison of the results with similar studies in literature

Figure 10 shows the comparison of the results with similar studies. It indicates the maximum improvement rates in thermal performance of the systems. When the graphic analysed it can be clearly seen that the result of current study was very close to other studies. For example while Aydin et al (2020) and Kumar & Kaushal (2020) had improvement rates as 33.4 % and 36.3 % respectively, the current study had an improvement rate as 35.47%. Therefore figure 10 shows that the obtained results are in agreement with other studies in the literature.

4. CONCLUSIONS

The usage of GNPs in thermal systems is rising nowadays. In this study thermal performance of the thermosiphon type heat pipe charged with nanofluid including GNPs was investigated. The base fluid was DW+EG (95:5) mixture. The results had a good agreement with other studies in the literature as mentioned below:

- Adding of the GNPs to DW+EG mixture decreased the evaporating temperature. Therefore thermal resistance of the thermosiphon was decreased.
- For the same mass flow rate, increasing in heater power decreased the thermal resistance.
- The lowest resistance value was reached as 0.076 K/W when the nanofluid, heating power and mass flow rate were DW+EG+GNPs, 400 W, 3 g/s respectively.
- GNPs had a significant effect on thermal efficiency of the thermosiphon.
- The best value of thermal efficiency was achieved as 57.1 % when the working fluid was DW+EG+GNP nanofluid at the conditions of 400 W heating power and 6 g/s flow rate.
- In further studies, effect of different mixing ratio of DW and EG can be investigated. The usage of different nano particles and particle concentrations can be analysed as well.

NOMENCLATURE

DW: Deionized Water
 EG: Ethylene Glycol
 GNP: Graphene Nano Platelet
 SEM: Scanning Electron Microscope
 η : Thermal Efficiency
 \dot{Q}_c : Heat Transfer Rate (Condenser)
 \dot{Q}_e : Heating Power
 \dot{m}_{water} : Mass Flow Rate of Water
 $c_{p,water}$: Specific Heat Capacity of Water
 ΔT_{water} : Temperature Difference
 T_e : Wall Temperature of Evaporator
 T_c : Wall Temperature of Condenser
 R: Thermal Resistance

REFERENCES

- Aberoumand, S. and Jafarimoghaddam, A., 2017, "Experimental study on synthesis, stability, thermal conductivity and viscosity of Cu-engine oil nanofluid", *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. 71, pp. 315–322.
- Arif, M., Kumam, P., Khan, D. and Watthayu, W., 2021, "Thermal performance of GO-MoS₂/ engine oil as Maxwell hybrid nanofluid flow with heat transfer in oscillating vertical cylinder", *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 27, No. May., Article ID. 101290.
- Aydın, D. Y., Gürü, M., Sözen, A. and Çiftçi, E., 2020, "Thermal performance improvement of the heat pipe by employing dolomite/ethylene glycol nanofluid", *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 9, No. 1, pp. 23–27.
- Choi, S. U. S. and Eastman, J. A., "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles", *International Mechanical Engineering Congress and Exhibition, United States*, 12-17 November 1995.
- Cruz, P. A. D., Yamat, E.-J. E., Nuqui, J. P. E., & Soriano, A. N. (2022). Computational Fluid Dynamics (CFD) Analysis of the Heat Transfer and Fluid Flow of Copper (II) Oxide-Water Nanofluid in a Shell and Tube Heat Exchanger. *Digital Chemical Engineering, Early View*, 100014. <https://doi.org/10.1016/j.dche.2022.100014>
- Dong, J., Zheng, Q., Xiong, C., Sun, E. and Chen, J., 2022, "Experimental investigation and application of stability and thermal characteristics of SiO₂-ethylene-glycol/water nanofluids", *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 176, No. February, Article ID. 107533.
- Filiz, Ç. and Yetişken, Y., 2021, "Sıralı Tip Isı Borulu Isı Değiştiricilerinde MgO+CuO/Su ve MgOAl₂O₃/Su Nanoakışkanları Kullanılarak Performansın İyileştirilmesi: Karşılaştırmalı Deneysel Çalışma", *Journal of Polytechnic*, vol. 24, No. 4, pp. 1327–1335.
- Ghorabae, H., Emami, M. R. S., Moosakazemi, F., Karimi, N., Cheraghian, G. and Afrand, M., 2021, "The use of nanofluids in thermosyphon heat pipe: A comprehensive review", *Powder Technology*, vol. 394, pp. 250–269.
- Kakavandi, A. and Akbari, M., 2018, "Experimental investigation of thermal conductivity of nanofluids containing of hybrid nanoparticles suspended in binary base fluids and propose a new correlation", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 124, pp. 742–751.
- Kumar, J. and Kaushal, R., 2020, "Experimental analysis of heat pipe based evacuated tube solar collector using graphene/ ethylene glycol-water nanofluids", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Ahead-Of-Print, 1-19. DOI: 10.1080/15567036.2020.1854393
- Martin, K. and Boran, K., 2021, "Isı Borulu Havadan Havaya Isı Değiştiricisinde CuO+Fe/Saf Su ve CuO/Saf Su Nano Akışkanlarının Kullanımının Isıl Performansa Etkisinin İncelenmesi", *Journal of Polytechnic*, vol. 24 No. 3, pp. 763–770.

Nfawa, S. R., Abu Talib, A. R., Basri, A. A. and Masuri, S. U., 2021, "Novel use of MgO nanoparticle additive for enhancing the thermal conductivity of CuO/water nanofluid", *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 27, No. June, Article ID. 101279.

Soltani, F., Toghraie, D. and Karimipour, A., 2020, "Experimental measurements of thermal conductivity of engine oil-based hybrid and mono nanofluids with tungsten oxide (WO₃) and MWCNTs inclusions", *Powder Technology*, vol. 371, pp. 37–44.

Soltani, O. and Akbari, M., 2016 "Effects of temperature and particles concentration on the dynamic viscosity of MgO-MWCNT/ethylene glycol hybrid nanofluid: Experimental study", *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, vol. 84 No. October, pp. 564–570.

Sözen, A., Filiz, Ç., Aytaç, İ., Martin, K., Ali, H. M., Boran, K. and Yetişken, Y., 2021, "Upgrading of the Performance of an Air-to-Air Heat Exchanger Using Graphene/Water Nanofluid", *International Journal of Thermophysics*, vol. 42, No. 3, pp. 1–15.

Suganthi, K. S., Leela Vinodhan, V. and Rajan, K. S., 2014, "Heat transfer performance and transport properties of ZnO-ethylene glycol and ZnO-ethylene glycol-water nanofluid coolants", *Applied Energy*, vol. 135, pp. 548–559.

Sun, L., Zhao, Q., Zhang, Y., Gao, W. and Jing, D., 2021, "Insights into the rheological behavior of ethanol-based metal oxide nanofluids", *Journal of Molecular Liquids*, vol. 323, Article ID. 115006.

Sundar, L. S., Farooky, M. H., Sarada, S. N. and Singh, M. K., 2013, "Experimental thermal conductivity of ethylene glycol and water mixture based low volume concentration of Al₂O₃ and CuO nanofluids", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 41, pp. 41–46.

Sundar, L. S., Punnaiah, V., Sharma, K. V., Chamkha, A. J. and Sousa, A. C. M., 2021, "Thermal entropy and exergy efficiency analyses of nanodiamond/water nanofluid flow in a plate heat exchanger", *Diamond and Related Materials*, vol. 120, No. August, Article ID. 108648.

Vasheghani, M., Marzbanrad, E., Zamani, C., Aminy, M. and Raissi, B., 2013, "Thermal Conductivity And Viscosity Of TiO₂-Engine Oil Nanofluids", *Nanoscience and Technology: An International Journal*, vol. 4, No. 2, pp. 145–156.

Yashawantha, K. M. and Vinod, A. V., 2021, "ANFIS modelling of effective thermal conductivity of ethylene glycol and water nanofluids for low temperature heat transfer application", *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 24, No. March, Article ID. 100936.



NORMALİZE ISIL İŞLEMİNDE ARAKRİTİK ÖSTENİTLEME SICAKLIĞININ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ

¹Kutay KAYAALP , ²Ömer ŞAHİN , ³Volkan KILIÇLI 

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara, TÜRKİYE

^{2,3}Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Ankara, TÜRKİYE
¹kutay.kayaalp@gazi.edu.tr, ²osahin@gazi.edu.tr, ³vkilicli@gazi.edu.tr

Geliş/Received: 16.04.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 15.07.2022

ÖZ: Bu çalışmada, arakritik östenitleme sıcaklıklarında tavlama sonrası, normalize ısıl işlemlerinin alaşımsız küresel grafitli dökme demirin (KGDD) mikroyapısal değişimine ve mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Y blok olarak dökülen alaşımsız KGDD'den çekme numuneleri tornalamayla hazırlanmıştır. Çekme numuneleri farklı arakritik östenitleme sıcaklıklarında (770°C ila 820°C) 60 dk östenitleme sonrası havada soğutulmuştur. Optik mikroskop ve tarama elektron mikroskobuyla (SEM) mikroyapılar karakterize edilmiştir. Çekme ve sertlik testleriyle mekanik özellikler belirlenmiştir. Belirli bir kimyasal bileşimdeki KGDD'de arakritik östenitleme sıcaklıklarından normalize ısıl işlemiyle, % 8 ila % 75 perlit hacim oranlarında KGDD üretilebilmektedir. Arakritik östenitleme sıcaklığının artışıyla perlit hacim oranının belirgin bir şekilde arttığı belirlenmiştir. Ayrıca perlit hacim oranının artışıyla sertlik, akma ve çekme dayanımında belirgin artış tespit edilmiştir. Buna karşın toplam uzama ve kesit alanı daralmasının azalan ötektoid öncesi ferrit hacim oranıyla azaldığı belirlenmiştir. Perlit hacim oranının % 8'den % 75 artmasıyla; sertlik 181 BHN'den 259 BHN'ye; akma dayanımı 348 MPa'dan 470 MPa'ya; çekme dayanımı 569 MPa'dan 790 MPa'ya belirgin bir şekilde artarken toplam % uzama % 12,6'dan % 8,3'e azalmaktadır. Artan perlit hacim oranıyla kırık yüzeylerdeki çukurcukların azaldığı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Normalize ısıl işlemi, Küresel grafitli dökme demir, Arakritik östenitleme, Mekanik özellikler, Perlit miktarı

Effect of Intercritical Austenitization Temperatures in Normalizing Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Ductile Iron

ABSTRACT: In this investigation, the effect of normalizing heat treatments from annealing at intercritical austenitization temperatures on the microstructural evolution and mechanical properties of ductile iron was examined. Tensile specimens were prepared by turning from Y block castings made from unalloyed ductile iron. The specimens were air-cooled from different intercritical austenitization temperatures at (770°C to 820°C) for 60 minutes. Microstructural characterization was performed by optical microscope and scanning electron microscope (SEM). Mechanical properties were determined by tensile and hardness tests. Ductile iron containing different pearlite volume fractions (8 % to 75 %) can be produced by normalizing heat treatment from intercritical austenitization temperatures in ductile iron with a certain chemical composition. The pearlite volume fraction is significantly increased with increasing intercritical austenitization temperatures. Moreover, the hardness, yield, and tensile strength are significantly increased with increasing pearlite volume fraction. However, total elongation and reduction in area decreased with decreasing volume fraction of proeutectoid ferrite. With increasing volume fraction of pearlite from 8 % to 75 %; the hardness increased from 181 BHN to 259 BHN; yield strength increased from 348 MPa to 470 MPa; and the tensile strength significantly increased from 569 MPa to 790 MPa, while the total % elongation decreased from 12.6 % to 8.3 %. The fractographic analysis showed that the number

of dimples zones decreased with increasing volume fraction of pearlite.

Keywords: Normalizing heat treatments, Ductile cast iron, Intercritical austenitization, Mechanical properties, Pearlite volume fraction

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Küresel grafitli dökme demirler (KGDD), diğer dökme demirlere kıyasla daha yüksek dayanım ve sünekliğe sahip olmalarından dolayı en çok kullanılan dökme demirler arasında yerini almıştır [Jenkins ve Forest, 1990]. KGDD'ler otomotiv/imalat sektörü ve makine endüstrisinde yoğun kullanım alanına sahiptirler. KGDD'ler çok iyi dökülebilirlik ve sade karbonlu sıcak dövülmüş çeliğin tokluğunu bir araya getirmenin yanı sıra, dökülmüş halde çok iyi çekme dayanımı ve toplam uzama değerlerine sahiptir. [Jenkins ve Forest, 1990; Elliot, 1988; Hughes, 1988; Karsay, 1979].

Arakritik östenitleme ısıl işlemleri, konvansiyonel östenitlemeye göre daha düşük sıcaklıkta yapılan kısmi östenitleme ısıl işlemleridir. KGDD'lerde arakritik östenitleme sıcaklıklardan su verme ile ferrit+martenzit veya östemperlemeyle ferrit+ösferritten oluşan matris mikroyapıları üretilebilmektedir [Erdogan ve diğ., 2009; Kilicli ve Erdogan, 2010]. Arakritik östenitleme sonrası, östemperleme veya yağda su verme ısıl işlemleriyle martenzit veya ösferrit gibi yapıların miktar ve morfolojisinin kolaylıkla değiştirilerek mekanik özelliklerin kontrol edilebildiği araştırmacılar tarafından bildirilmektedir [Erdogan ve diğ., 2008; Sahin ve diğ. 2007; Kilicli ve Erdogan, 2007; Panneerselvam ve diğ., 2007; Konca ve Tur, 2020,].

Araştırmacılar arakritik östenitleme sonrası östemperleme ısıl işlemiyle üretilen östemperlenmiş çift fazlı küresel grafitli dökme demirlerde östenitleme ve östemperleme sıcaklık/süresini değiştirmek suretiyle ösferrit hacim oranı ve morfolojisini değiştirerek mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisini oldukça geniş bir şekilde araştırmıştır [Rashidi, ve Moshrefi-Torbati, 2000; Putatunda ve Gadicherla, 2000; Aristizabal ve diğ. 2012]. Arakritik östenitleme sonrası yağda hızlı soğutma ısıl işlemiyle üretilen çift fazlı (α +martenzit) KGDD'de ısıl işlem parametrelerine bağlı olarak mikroyapı-mekanik özellikler ve aşınma direncine etkisi araştırmacılar tarafından incelenmiştir [Sahin ve diğ., 2007; Sogut ve diğ., 2019].

Arakritik östenitleme sıcaklıklarında östenitlemeyi müteakip su verme veya östemperlemeyle, sırasıyla ferrit+martenzit veya ferrit+ösferrit matris mikroyapısının mekanik özellikler üzerine etkisinin oldukça çok detaylı bir şekilde araştırılmıştır [Erdogan ve diğ., 2009; Kilicli ve Erdogan, 2010; Erdogan ve diğ., 2008; Sahin ve diğ. 2007; Kilicli ve Erdogan, 2007; Panneerselvam ve diğ., 2007; Konca ve Tur, 2020]. Buna karşın, KGDD'de arakritik östenitleme sıcaklıklarından normalize ısıl işleminin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisiyle ilgili sınırlı sayıda çalışma mevcuttur [Sogut ve diğ. 2019].

Bu çalışmada, arakritik östenitleme sıcaklığında östenitleme sonrası normalize ısıl işleminin KGDD'in mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Çalışmanın amacı; aynı kimyasal bileşimdeki alaşımsız bir küresel grafitli dökme demirde, arakritik östenitleme sıcaklıklarından östenitleme ve havada soğutma suretiyle farklı perlit ve ferrit miktarlarına sahip mikroyapılar elde ederek, bu mikroyapının mekanik özellikler üzerine etkisini belirlemektir.

MALZEME VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Malzeme (Material)

Küresel grafitli dökme demirin üretiminde 1 ton kapasiteli orta frekanslı indüksiyon ocağı kullanılmıştır. Ticari bir dökümhaneden gerçekleştirilen döküm işlemlerinde, indüksiyon ocağındaki soresel piki ve hurda karışımının ergitilmesiyle elde edilen sıvı metal 1500 °C'ye ulaştığında, 250 kg'lık işlem potasına alınarak % 6-7 Mg içeren ferro silikon alaşımlar ilave edilmek suretiyle 1450 °C'de Mg ile küreselleştirme ve aşılama işlemleri ve uygulanmıştır. Döküme hazır sıvı metal 1400 °C - 1450 °C sıcaklık aralığında Y blok kum kalıplara dökülmüştür. Deneysel çalışmalarda kullanılan alaşımsız KGDD'in

kimyasal bileşimi Çizelge 1’de verilmiştir. Çalışmalarda kullanılan alaşımsız KGDD’in mekanik özellikler bakımından EN-GJS-700-2 standardına uygun KGDD olduğu belirlenmiştir. Kimyasal kompozisyon, Y blok kalıba döküm öncesi dökülen çil numunelerden OBLF marka optik emisyon spektrometresi ile analiz edilmiştir.

Çizelge 1. Isıl işlemlerde kullanılan alaşımsız KGDD’in kimyasal bileşimi (ağırlıkça-%)

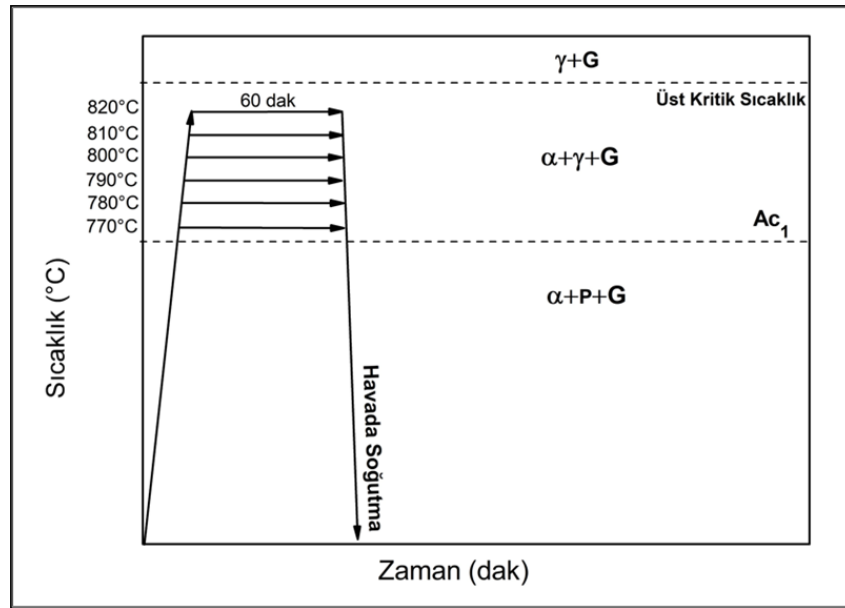
Table 1. The chemical composition of ductile cast iron used in the heat treatments (weight-%)

C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr	Ni	Cu	Ti	Co	Fe
3,68	2,49	0,3	0,025	0,012	0,04	0,02	0,015	0,52	0,01	0,02	Kalan

Isıl işlemler (Heat Treatments)

Isıl işlemlerde Heraeus marka elektrik dirençli fırın kullanılmıştır. Ø12 x 100 mm boyutlarında Y bloktan tornalanmış çubuklardan 5 adet ısıl işlem için hazırlanmıştır.

Parçaların üzerine elektrik direnç kaynağıyla K tipi ısıl çift kaynatılarak arakritik östenitleme sıcaklığının kontrolü gerçekleştirilmiştir. Şekil 1’de gösterilen farklı arakritik östenitleme sıcaklıklarında 60 dk östenitlenen KGDD parçalar havada soğumaya bırakılmıştır.



Şekil 1. Uygulanan ısıl işlemlerin şematik gösterimi

Figure 1. Schematically representation of applied heat treatments

Karakterizasyon Çalışmaları (Characterization Studies)

Isıl işlem sonrası KGDD çubuklardan Ø12x10mm boyutlarında parçalar kesilerek metalografik inceleme için hazırlanmıştır. Standart metalografik yöntemlerle numune hazırlığı yapılmış ve dağlayıcı olarak % 2 Nital çözeltisi kullanılmıştır. LAS (versiyon 4.6) görüntü analiz programı kullanılarak nodularite, nodül sayısı, ferrit ve perlit hacim oranlarının hesaplatılmıştır. 10 ayrı bölgeden yaklaşık 2,5 mm² alandan X100 büyütmede elde edilen optik mikroyapılar kullanılarak hacim oranı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Optik mikroyapılar Leica DMI 5000 M model optik mikroskop kullanılarak elde edilmiştir. Kırık yüzey karakterizasyonu için çekme testi sonrası yüzeyler Jeol JSM 6060 LV model tarama elektron mikroskobunda (SEM) incelenmiştir.

Mekanik Testler (Mechanical Tests)

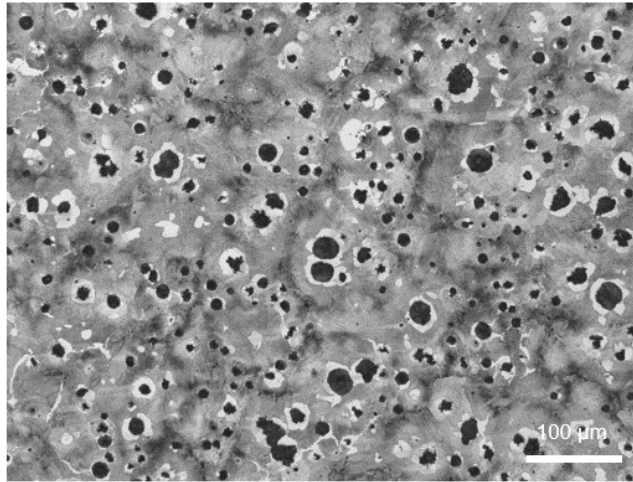
Çekme numuneleri ASTM E8M standardına [ASTM E8M/8M-21] uygun boyutlarda tornalanarak işletilmiştir. Çekme testlerinde Instron 3369 model çekme test cihazı kullanılmıştır. Çekme testleri 1,2 mm/dk hareketli çene hızında ve oda sıcaklığında yapılmıştır. Numunelerin statik tokluk değeri çekme eğrisinin altında kalan alanın toplamı BlueHill 2 yazılımı kullanılarak hesaplatılmıştır. Benzer ısıl işlem grubundan 5 adet numune test edilmiş ve ortalama değerler verilmiştir.

Sertlik değerleri Emcotest DuraVision 200 model sertlik ölçme cihazı kullanılarak, Brinell (BHN) yöntemiyle 2,5 mm WC bilya ve 187,5 kgf yük altında gerçekleştirilmiştir. Parlatılmış numunelerde 10 değişik noktadan ölçüm alınmış ve bu değerlerin ortalaması verilmiştir.

BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

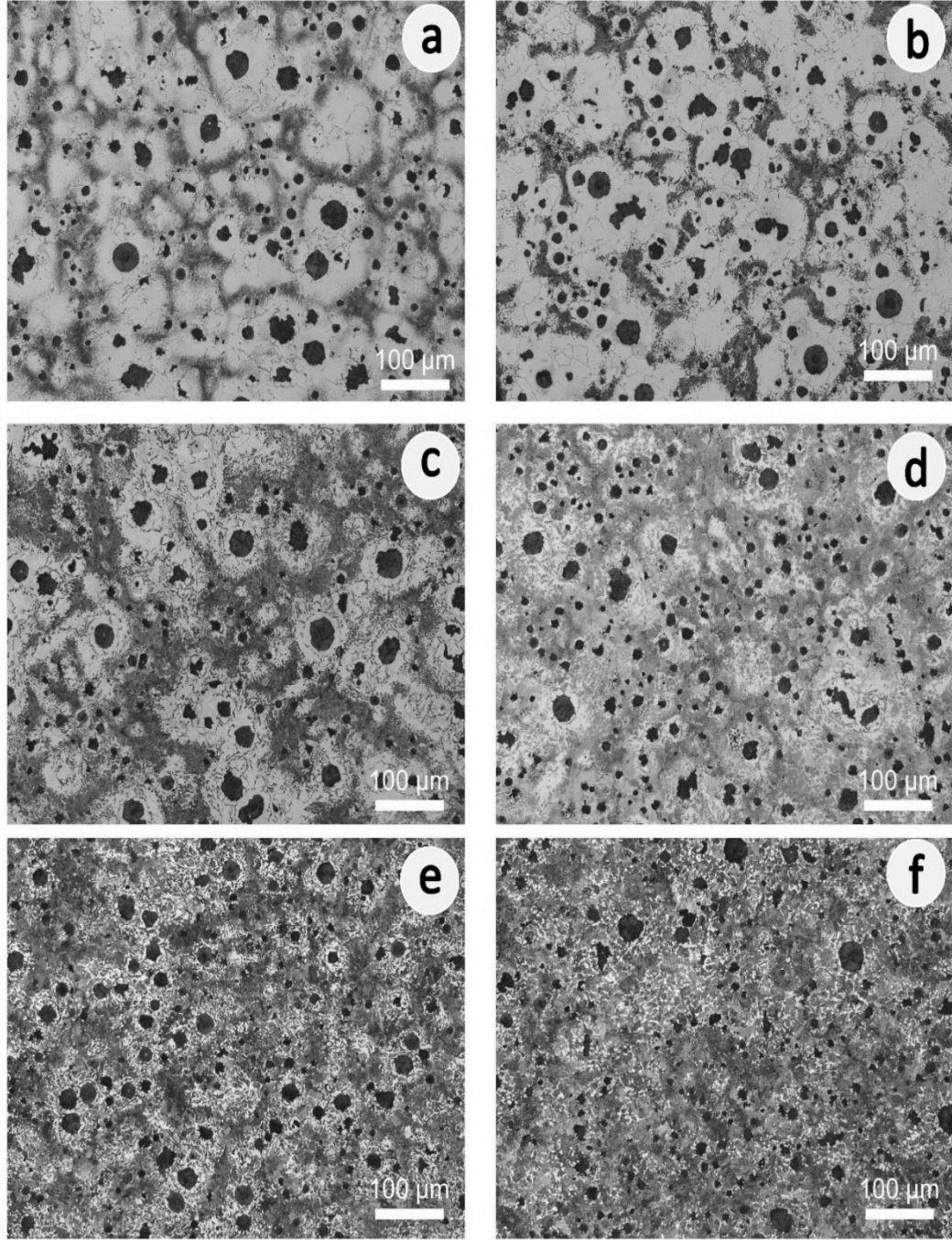
Mikroyapısal İnceleme Sonuçları (Microstructural Examination Results)

Dökülmüş koşullardaki KGDD'in optik mikroyapısı Şekil 2'de gösterilmektedir. Dökülmüş haldeki işlemsiz KGDD numunenin çoğunlukla perlitik yapıdan oluştuğu ve grafitlerin etrafının ferritik yapı ile çevrelediği gözlenmiştir. Bu yapı KGDD'lerde tipik olarak dana gözü yapı adlandırılmakta olup, perlitik KGDD mikroyapısı ile uyumlu bir mikroyapıdır. Dökülmüş haldeki KGDD'in 1 mm²'deki grafit nodül sayısı 216 adet ve nodularitesi % 93 olarak görüntü analiz yazılımıyla hesaplanmıştır.



Şekil 2. Dökülmüş haldeki alaşımsız küresel grafitli dökme demirin optik mikroyapısı
Figure 2. Optical microstructure of as-cast unalloyed ductile cast iron

Arakritik östenitleme sıcaklıklarında 60 dk tavlansın ve normalize edilmiş KGDD'in arakritik östenitleme sıcaklığıyla değişen optik mikroyapıları Şekil 3.a ila Şekil 3.f'de gösterilmektedir. Artan arakritik östenitleme sıcaklığıyla ferrit hacim oranı azalırken, perlit hacim oranının belirgin bir şekilde arttığı gözlenmektedir. Arakritik östenitleme sıcaklığında normalize edilmiş KGDD'lerde arakritik östenitleme sıcaklığının arttırılmasıyla tipik dana gözü yapı bozunmuş olup, grafit çevresindeki ferrit miktarı azalmıştır. Araştırmacılar artan östenitleme sıcaklığıyla perlit miktarının arttığı ve dana gözü yapının bozunduğunu rapor etmektedir [Kobayashi ve Yamamoto, 1988; Kobayashi ve Yamada, 1996;-20; Coskun ve diğ. 2008].

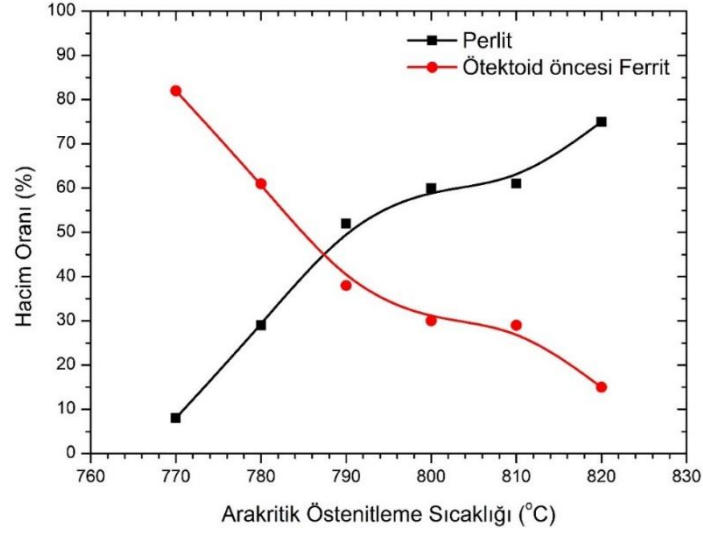


Şekil 3. Değişik arakritik östenitleme sıcaklıklarında 60 dk östenitlenmiş ve normalize edilmiş KGDD'in mikroyapıları; a) 770°C, b) 780°C, c) 790°C, d) 800°C, e) 810°C ve f) 820°C

Figure 3. Optical microstructures of ductile cast iron which austenitized at intercritical austenitization temperatures for 60 minutes and normalized from; a) 770°C, b) 780°C, c) 790°C, d) 800°C, e) 810°C, f) 820°C

Arakritik östenitleme sıcaklığıyla perlit miktarındaki değişim Şekil 4'te verilmiştir. Artan arakritik östenitleme sıcaklığıyla perlit hacim oranı % 8'den % 75'e artarken, ötektoid öncesi ferrit hacim oranı % 81,7'den % 14,7'ye azalmaktadır (Çizelge 2). Bilindiği üzere, $\alpha+\gamma+G$ bölgesinde östenitleme esnasında arakritik östenitleme sıcaklığı arttıkça, manivela kuralına göre östenit miktarı artarken ferrit miktarı azalmaktadır. Arakritik östenitleme sıcaklıklarındaki östenit normalize edilerek havada soğuma sonrasında iyi bilindiği üzere ince perlite dönüşmektedir. Tüm numunelerde grafit miktarı ~% 10 oranında olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 2). Araştırmacılar [Coskun ve diğ. 2008; Sylvester ve Kenneth, 2020; Gonzaga, 2013], artan arakritik östenitleme sıcaklığıyla perlit hacim oranının arttığını

bildirmektedir.



Şekil 4. Arakritik östenitleme sıcaklığıyla ötektoid öncesi ferrit ve perlit hacim oranının değişimi
Figure 4. Variation of the pearlite and proeutectoid ferrite volume fractions with intercritical austenitization temperatures

Çizelge 2. Mikroyapısal bileşenlerin ölçüm sonuçları

Table 2. The measurement results of microstructural constituents

Numune	Perlit hacim oranı (%)	Ötektoid öncesi ferrit hacim oranı (%)	Grafit hacim oranı (%)	Nodül sayısı adet/mm ²	Nodülerite (%)
İşlemsiz KGDD	70 ± 3,1	19,9 ± 2,1	10,1 ± 1,2	216	93
770 °C	8 ± 2,4	81,7 ± 2,1	10,3 ± 1,1	211	94
780 °C	29 ± 2,8	60,5 ± 2,2	10,5 ± 1,3	205	95
790 °C	52,0 ± 3,0	37,8 ± 2,3	10,2 ± 1,2	210	93
800 °C	60 ± 3,1	29,6 ± 2,2	10,4 ± 1,4	215	94
810 °C	67 ± 3,4	22,8 ± 2,4	10,2 ± 1,4	213	95
820 °C	75 ± 3,5	14,7 ± 2,5	10,3 ± 1,5	212	93

Mekanik Test Sonuçları (Mechanical Test Results)

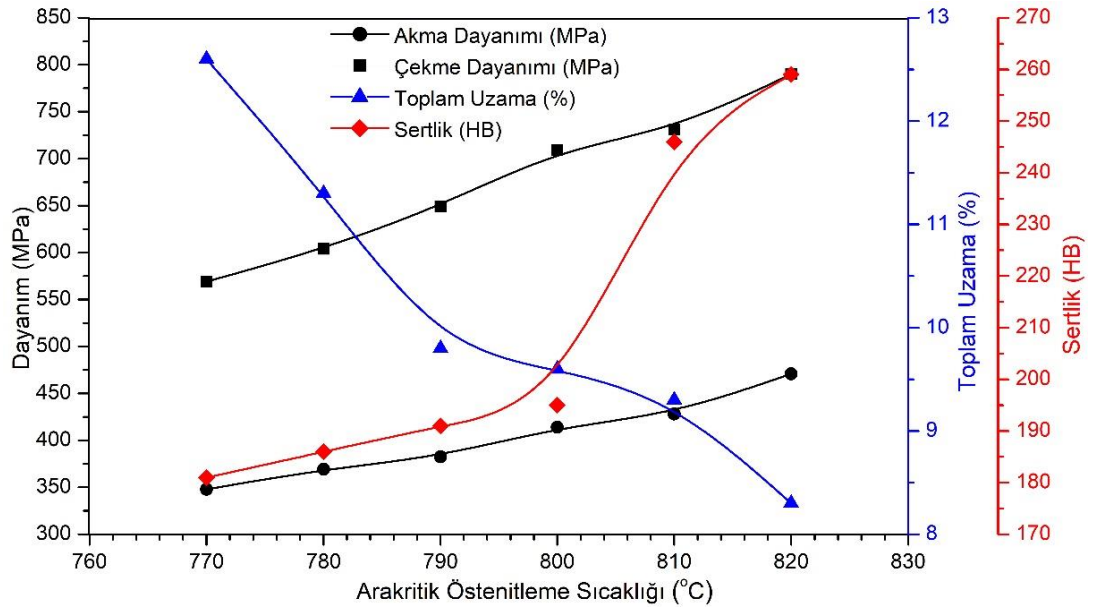
Arakritik östenitleme sıcaklıklardan normalize edilen KGDD numunelerin mekanik özellikleri Çizelge 3'te verilmektedir. Arakritik östenitleme sıcaklıklarından normalize edilmiş alaşımsız KGDD numunelerin akma dayanımı 347,9-470,9 MPa arasında ve çekme dayanımı 569,1-790,1 MPa arasında olduğu belirlenmiştir (Çizelge 3). 810°C'den yapılan normalize ısıtma işlemiyle üretilen numunelerin akma ve çekme dayanımı değerlerinin dökülmüş haldeki numunenin akma ve çekme dayanımı değerlerine çok yakın olduğu tespit edilmiştir. Akma ve çekme dayanımı artan arakritik östenitleme sıcaklığıyla artarken toplam % uzama değeri önemli ölçüde azalmaktadır. Bununla birlikte, artan arakritik östenitleme sıcaklığı ile kesit alan daralması ve statik tokluk azalmıştır (Çizelge 3).

Çizelge 3. Çekme ve sertlik testleri sonuçları

Table 3. Tensile and hardness test results

Numune	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Kopma uzaması (%)	Sertlik (BHN 2,5/187,5)	Kesit alan daralması (%)	Statik Tokluk (Joule)
İşlemsiz KGDD	418,3 ± 3,7	737,8 ± 3,4	7,65 ± 0,9	204 ± 1,5	6 ± 1,1	33,7 ± 5,4
770 °C	347,9 ± 9,7	569,1 ± 11,7	12,6 ± 1,1	181,0 ± 1,5	11,3 ± 2,2	46,1 ± 7,4
780 °C	369,3 ± 8,1	603,9 ± 2,2	11,3 ± 0,5	186,0 ± 2,2	10,3 ± 0,3	43,3 ± 4,1
790 °C	382,6 ± 4,3	649,3 ± 22,7	9,8 ± 0,9	191,0 ± 2,0	8,0 ± 0,9	42,1 ± 2,2
800 °C	414,1 ± 12,5	709,4 ± 21,5	9,6 ± 1,2	195,0 ± 3,5	7,2 ± 0,3	40,2 ± 3,9
810 °C	428,2 ± 9,6	731,1 ± 12,4	9,3 ± 0,9	246,0 ± 3,3	6,6 ± 0,8	40,1 ± 6,9
820 °C	470,9 ± 2,8	790,1 ± 6,8	8,3 ± 1,3	259,0 ± 4,0	5,8 ± 0,2	39,5 ± 3,4

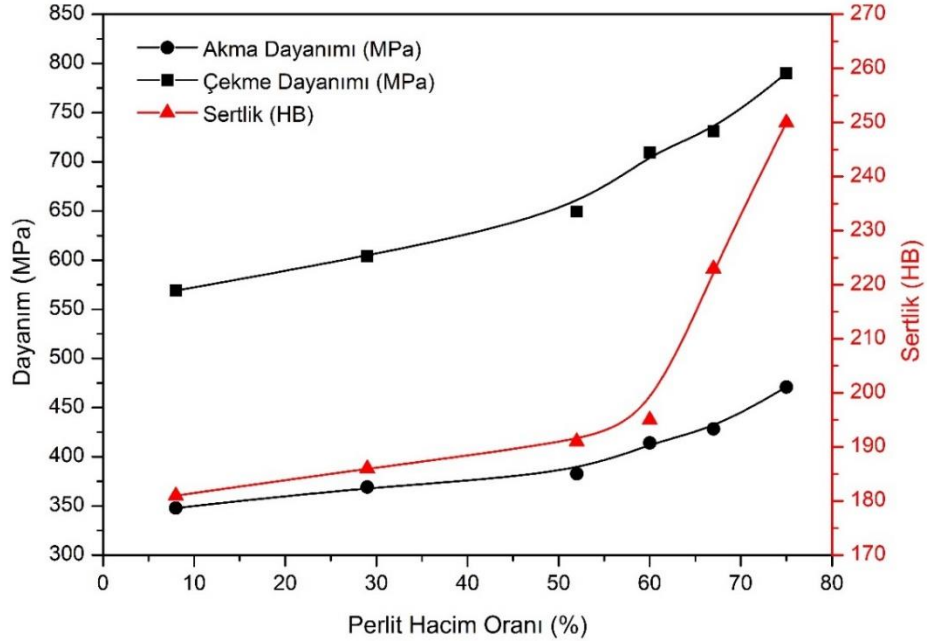
Aarakritik östenitleme sıcaklığıyla KGDD numuneleri mekanik özelliklerindeki değişim Şekil 5’de sunulmuştur. Aarakritik östenitleme sıcaklığının artışı sertlik, akma ve çekme dayanımında artışa neden olurken, uzama ve alan daralması değerlerinde belirgin bir azalmaya neden olmaktadır. Aarakritik östenitleme sıcaklıklardan normalize edilen numunelerin sertlik değerleri 181-259 BHN arasında değişmektedir (Çizelge 3). Aarakritik sıcaklığının artışı ile perlit miktarının artışı sertlik değerlerinde artışa neden olmuştur. Özellikle 810°C ve 820°C aarakritik östenitleme sıcaklıkların yapılan normalize ısıl işlemi sonucu sertlik değerlerin belirgin bir artış gözlenmiştir.



Şekil 5. Aarakritik östenitleme sıcaklığıyla mekanik özellikler arasındaki ilişki

Figure 5. The relationship between mechanical properties and intercritical austenitization temperatures

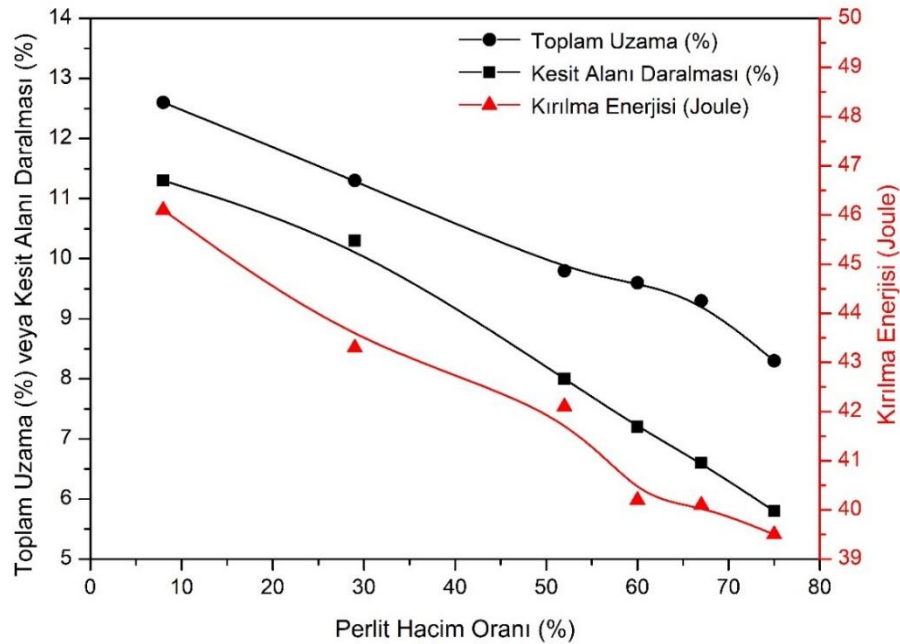
Aarakritik östenitleme sıcaklıklardan normalize edilen KGDD numunelerin perlit miktarıyla mekanik özelliklerinin değişimi Şekil 6’da gösterilmektedir. Sertlik, akma ve çekme dayanımı artan perlit hacim oranıyla birlikte belirgin bir şekilde artmaktadır. Perlit miktarının artması dağılım mukavemetlenmesine neden olduğundan numunelerin mekanik özelliklerinde belirgin bir iyileşmeye neden olmuştur. Perlit miktarının % 9’dan % 75’a artması, çekme dayanımında 569 MPa’dan 790 MPa’ya artışa neden olmuştur. Alaşımız KGDD numunelerde, % 60 perlit miktarından sonra mekanik özelliklerde belirgin artış tespit edilmiştir. Araştırmacılar perlit hacim oranının artışıyla mekanik özelliklerin geliştiği bildirmektedir [Sylvester ve Kenneth, 2020; Gonzaga, 2013].



Şekil 6. Perlit hacim oranının akma-çekme dayanımı ve sertliğe etkisi

Figure 6. Effect of volume fraction of pearlite on yield-tensile strength and hardness

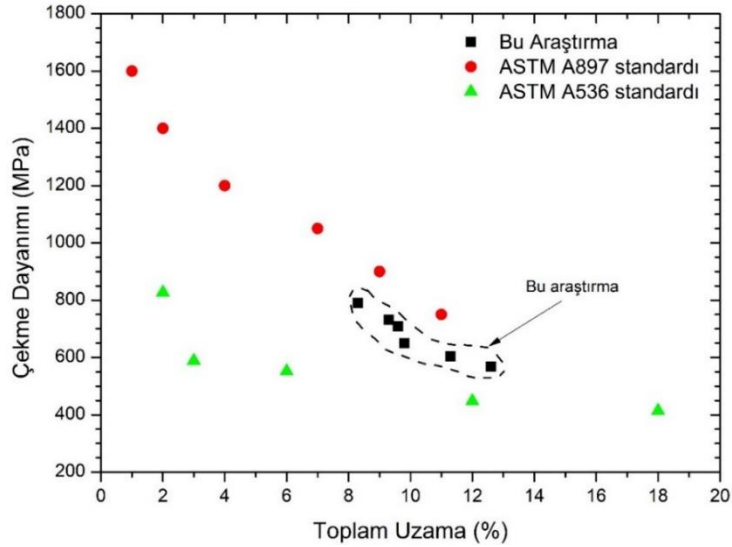
Aarakritik östenitleme sıcaklıklardan normalize edilen KGDD numunelerde perlit miktarıyla toplam % uzama, alan daralması ve statik tokluk değerlerinin değişimi Şekil 6'da verilmiştir. Artan perlit miktarıyla toplam % uzama, alan daralması ve statik tokluk belirgin bir şekilde azalmaktadır. Perlit miktarının artması sünek ve yumuşak ferrit miktarında azalmaya neden olmasından dolayı mekanik özellik değerlerinde belirgin azalmaya neden olmuştur. Bu çalışmaya benzer olarak, perlit miktarının artması toplam uzama ve statik tokluk değerlerinde azalmaya neden olduğunu önceki yapılan bir araştırmada rapor edilmektedir [Gonzaga, 2013].



Şekil 7. Perlit hacim oranının statik tokluk, kesit alan daralması ve toplam % uzama üzerine etkisi

Figure 7. Effect of volume fraction of pearlite on fracture energy, reduction in area, and total elongation %

Arakritik östenitleme sıcaklıklardan normalize edilen KGDD numunelerin toplam uzama ve çekme dayanımı değerlerinin standartlarda verilen KGDD'ler ile karşılaştırılması Şekil 8'de gösterilmektedir. Ferrit + perlitik mikroyapıya sahip arakritik östenitleme sıcaklıklarından normalize edilmiş KGDD'lerin çekme dayanımı ve toplam % uzama değerleri ilgili ASTM A536 ve ASTM A897 standartlarıyla karşılaştırıldığında, dökülmüş koşullardaki ferritik/perlitik KGDD'ler ile östemperlenmiş KGDD'ler arasında çekme dayanımı ve toplam uzama değerine sahip oldukları gözlenmektedir. 820°C'den havada soğutulmuş KGDD'in (% 75 perlit miktarı) toplam % uzama değeri ve çekme dayanımı, ASTM A897'de verilen östemperlenmiş sınıf olarak bilinen ve çekme dayanımı 750 MPa ve toplam uzama değeri % 11 olan KGDD'den daha yüksek toplam uzama ve çekme dayanımı sergilemiştir.

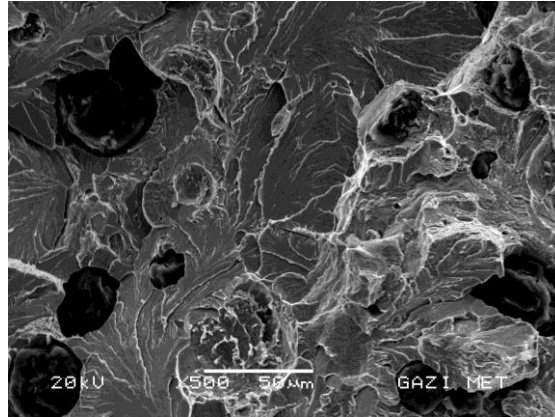


Şekil 8. ASTM standart dökme demir sınıflarıyla bu çalışmada üretilen numunelerin toplam uzama ve çekme dayanımlarının karşılaştırılması

Figure 8. Comparison of total elongation and tensile strength values of this study with ASTM standard cast iron grades

Kırık Yüzey İncelemesi (Examination of Fracture Surfaces)

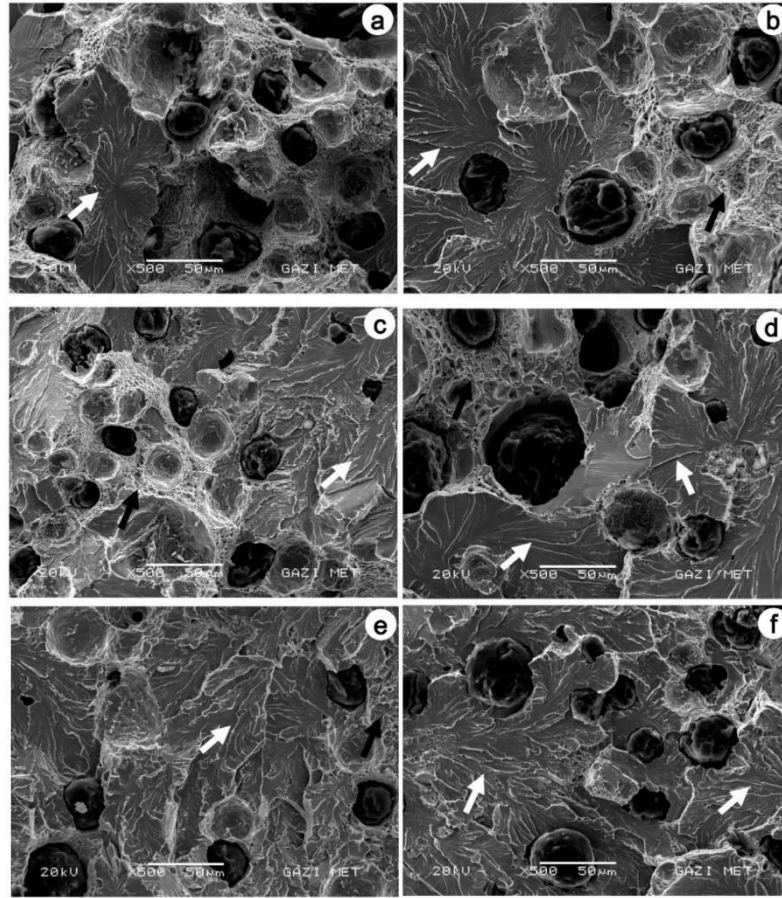
Tüm çekme numunelerin kırık yüzeyleri SEM ile incelenmiştir. Dökülmüş haldeki KGDD numunenin kırık yüzey SEM mikroyapısı Şekil 9'da verilmiştir. Dökülmüş haldeki KGDD'de nispeten yüksek olan perlit miktarı (% 70) gevrek kırılmanın delili olan düzgün yüzey ayrılma (quasi-cleavage) oluşumuna neden olmuştur (Şekil 9).



Şekil 9. Dökülmüş koşuldaki KGDD numunenin kırık yüzey SEM mikroyapısı

Figure 9. SEM fractography of as-cast ductile iron specimen

Arakritik östenitleme sıcaklıklarında normalize edilmiş numunelerin kırık yüzey SEM mikroyapıları Şekil 10.a ila Şekil 10.f'de verilmiştir. Sünek kırılmanın delili olan mikro çukurcuklar (dimples) en fazla 770°C'den normalize edilen KGDD numunede gözlenirken, 820°C'den normalize edilen KGDD numunede daha az olduğu belirlenmiştir. Arakritik östenitleme sıcaklığındaki arttırılmasıyla mikro çukurcuklar azalmıştır. Gevrek kırılmanın delili olan düzgün yüzey ayrılma (quasi-cleavage) bölgeleri ise en fazla 820°C'den normalize edilen KGDD numunede, en az ise 770°C'den normalize edilen KGDD numunede gözlenmiştir. Arakritik östenitleme sıcaklığındaki artış düzgün yüzey ayrılma bölgelerinde artışa neden olmuştur. Kırık yüzey incelemelerinde mikro çukurcuklu bölgelerin sünek kırılmanın ve düzgün yüzey ayrılma kırılmasının ise gevrek kırılmanın delili olduğu mevcut literatürden iyi bilinmektedir [Underwood ve Banerjee, 1988]. Arakritik östenitleme sıcaklığının artışıyla KGDD numunelerin kırılma modları sünekten gevrek kırılmaya doğru değişmektedir.



Şekil 10. Farklı arakritik östenitleme sıcaklıklarında 60 dk östenitlenmiş ve normalize edilmiş KGDD çekme numunelerinin kırık yüzey SEM mikroyapıları; a) 770°C, b) 780°C, c) 790°C, d) 800°C, e) 810°C ve f) 820°C. (gevrek klivaj kırılmayı beyaz oklar, sünek kırılma bölgelerini ise siyah oklar ise göstermektedir)

Figure 10. Fracture surface SEM fractography of the tensile specimens which austenitized at different intercritical austenitization temperatures for 60 min; a) 770°C, b) 780°C, c) 790°C, d) 800°C, e) 810°C, and f) 820°C. White arrows show brittle cleavage fracture and black arrows show ductile fracture regions

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, arakritik östenitleme sıcaklıklarının ve normalize ısı işlemlerinin alaşımsız KGDD'in mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir;

- Alaşımsız KGDD'de arakritik östenitleme sıcaklıklarından normalize ısı işlemiyle, % 8 ila % 75 arasında perlit miktarına sahip KGDD'ler geliştirilebilmektedir.

- Arakritik östenitleme sıcaklıklarından normalize edilmiş KGDD'de artan arakritik östenitleme sıcaklığıyla birlikte ötektoid öncesi ferrit miktarı % 81,7'den % 14,7'ye azalmaktadır.
- Perlit miktarındaki artış, sertlik değerini 181 BHN'den 259 BHN'ye; akma dayanımını 348 MPa'dan 470 MPa'ya; çekme dayanımını 569 MPa'dan 790 MPa'ya belirgin bir şekilde arttırırken toplam % uzama değeri % 12,6'dan % 8,3'e azalmaktadır.
- Arakritik östenitleme sıcaklıklarından normalize edilmiş KGDD'ler ASTM A536 ve ASTM A897 standartlarıyla karşılaştırıldığında, dökülmüş koşullardaki ferritik/perlitik KGDD'ler ile östemperlenmiş KGDD'ler arasında toplam uzama ve çekme dayanımı sergiledikleri belirlenmiştir.
- Arakritik östenitleme sıcaklığının artışıyla perlit miktarındaki artış KGDD numunelerde sünekten gevreğe doğru kırılma modunda değişime neden olmaktadır.

SEMBOLLER (SYMBOLS)

BHN: Brinell Sertlik Numarası
 KGDD: Küresel Grafitli Dökme Demir
 LAS: Leica Application Suite
 MPa: Mega Paskal
 α : Ferrit
 γ : Östenit
 G: Grafit

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar, 07/2020-19 kodlu proje ile finansal destek sağlayan Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Aristizabal, R., Foley, R., and Druschitz, A., 2012, "Intercritically austenitized quenched and tempered ductile iron", International Journal of Metalcasting, Vol. 6, No.4, pp. 7-14.
- ASTM E8/E8M-21, 2021, "Standard test methods for tension testing of metallic materials", ASM International, USA.
- Coskun, S., Kilicli, V. and Erdogan, M., "Arakritik östenitleme sıcaklıklarından farklı hızlarda soğutmanın küresel grafitli dökme demirin mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerine etkisi", 14. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi (IMMC2008), İstanbul, 96-104, 16-19 Ekim 2008.
- Elliot, R., 1988, Cast Iron Technology, Butterworths&Co, London, UK.
- Erdogan, M., Kilicli, V., and Demir, B., 2008, "The influence of the austenite dispersion on phase transformation during the austempering of ductile cast iron having a dual matrix structure", International Journal of Cast Metals Research, Vol. 99, No. 7, pp. 751-760.
- Erdogan, M., Kilicli, V., and Demir, B., 2009, "Transformation characteristics of ductile iron austempered from intercritical austenitizing temperature ranges", Journal of Materials Science, Vol. 44, No. 5, pp. 1394-1403.
- Gonzaga, R.A., 2013, "Influence of ferrite and pearlite content on mechanical properties of ductile cast irons", Materials Science and Engineering A, Vol. 567, No.1, pp. 1-8.
- Hughes, I. C. H., 1988, Ductile Iron in Casting, ASM International, Ohio, USA.
- Jenkins, L. R. and Forrest, R. D., 1990, Ductile iron, properties and selections: irons, steels and high performance alloys (First edition), ASM International, Ohio, USA.
- Karsay, S.I., 1979, Ductile Iron Production and Practices, American Foundrymen's Society, USA.
- Kilicli, V. and Erdogan, M., 2007, "Effect of ausferrite volume fraction and morphology on tensile

- properties of partially austenitised and austempered ductile irons with dual matrix structures”, *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 20, No. 4, pp. 202-214.
- Kilicli, V. and Erdogan, M., 2010, “The nature of the tensile fracture in austempered ductile iron with dual matrix microstructure”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 19, No. 1, pp. 142-149.
- Kobayashi, T. and Yamada, S., 1996, “Effect of holding time in the ($\alpha + \gamma$) temperature range on toughness of specially austempered ductile iron”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 27, No. 7, pp. 1961-1971.
- Kobayashi, T. and Yamamoto, H., 1988, “Development of high toughness in austempered type ductile cast iron and evaluation of its properties”, *Metallurgical Transactions A*, Vol. 19, No.2, pp. 319-327.
- Konca E., Tur K., 2020, “Östenitleme Sıcaklığın EN-GJS-600-3 Küresel Grafitli Dökme Demirin Östemperlenme Davranışına Etkisi”, *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Vol. 8, No. 3, pp. 706-722.
- Panneerselvam, S., Putatunda, S., Gundlach, R., 2017, “Influence of intercritical austempering on the microstructure and mechanical properties of austempered ductile cast iron (ADI)”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 694, No. 1, pp. 72-80.
- Putatunda, S. K. and Gadicherla, P. K., 2000, “Effect of austempering time on mechanical properties of a low manganese austempered ductile iron”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 9, No. 2, pp. 193-203.
- Rashidi, A. M. and Moshrefi-Torbati, M., 2000, “Effect of tempering conditions on the mechanical properties of ductile cast iron with dual matrix structure (DMS)”, *Materials Letters*, Vol. 45, No. 3-4, pp. 203-207.
- Sahin, Y., Erdogan, M., and Cerah, M., 2008, “Effect of martensite volume fraction and tempering time on abrasive wear of ferritic ductile iron with dual matrix”, *Wear*, Vol. 265, No. 1-2, pp. 196-202.
- Sahin, Y., Erdogan, M., and Kilicli, V., 2007, “Wear behavior of austempered ductile irons with dual matrix structures”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 444, No. 1-2, pp. 31-38.
- Sogut, M.U., Ugurlu S., Kilicli V., “Controlling of pearlite volume fraction by air cooling from intercritical austenitizing temperatures in GGG70 ductile cast iron”, 4th International Iron&Steel Symposium (UDCS’2019), Karabük, 340-342, 4-6 April 2019.
- Sylvester, O.O, Kenneth, K., 2020, “Structural characterization and mechanical properties of pearlite - enhanced micro-alloyed ductile irons”, *Journal of King Saud University*, Vol. 32, No.3, pp. 205-210.
- Underwood, E.E., Banerjee, K., 1987, *ASM Metals Handbook, Fractography*, vol. 12, ASM International Ohio, USA.



PERFORMANCE INVESTIGATION OF BIFACIAL PHOTOVOLTAIC PANELS AT DIFFERENT GROUND CONDITIONS

¹Muharrem Hilmi AKSOY , ²Murat Kubilay ÇALIK 

¹Konya Technical University, Engineering and Natural Sciences Faculty, Mechanical Engineering Department, Konya, TÜRKİYE

¹mhaksoy@ktun.edu.tr, ²muratkubilaycalik@gmail.com

(Geliş/Received: 14.05.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 15.07.2022)

ABSTRACT: Photovoltaic (PV) panels are generally used for monofacial applications due to the back surface coating materials. When the coating material is transparent, it is defined as bi-facial PV. In this study, the variable albedo effects on bi-facial PVs in different ground conditions were examined. The results were compared with monofacial PV panels in the same conditions for the Konya region. Bifacial PV panels were analyzed under white, sand, and asphalt ground conditions. Simulations were made by the PVsyst program, and the results were compared by global radiation value, the performance ratio (PR), and the produced energy results. An installed capacity of 54,6 kWp bifacial and monofacial PV panels with a horizontal angle of 35°, azimuth angle of 0°, and 6m intervals for roof installation is considered. It has been observed that the yearly total solar radiation value of 1969 kWh/m² occurs on the monofacial PV, which is higher as 6,4% for the white ground, 2,4% for the sand ground, and 0,8% for the asphalt ground conditions. The annual energy generated in the Konya region is calculated as 91,197 MWh, 94,404 MWh, and 97,730 MWh for asphalt, sand, and white ground conditions. It was only 105,690 MWh for monofacial PV panels. It has been determined that the performance ratio of the system in June, which is one of the months of the highest radiation occurred, 7,0% higher than the sand ground conditions, 10,4% compared to the asphalt ground, and 14,5% higher than the monofacial photovoltaic system. It was evaluated that the ground conditions of the bi-facial panels contributed significantly to the panel efficiency and performance ratio and could be applied with a small investment cost compared to the project's total cost.

Keywords: Albedo, Bifacial photovoltaic panel, Photovoltaic panel, PVsyst, Performance ratio

Çift Yüzlü Fotovoltaik Panellerin Farklı Zemin Koşullarında Performansının İncelenmesi

ÖZ: Fotovoltaik paneller genellikle arka yüzey kaplama malzemelerinden dolayı tek yüzlü olarak kullanılmakta olup, kaplama malzemesi şeffaf olarak kullanıldığında çift yüzlü panel olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada, Konya bölgesinde çift yüzlü panellerin farklı zemin koşullarında oluşan albedo etkilerinde incelenerek sonuçlar aynı koşullardaki tek yüzlü fotovoltaik paneller ile karşılaştırılmıştır. Çift yüzlü paneller beyaz, kum ve asfalt zemin koşullarında incelenmiştir. Simülasyonlar PVsyst programı ile yapılarak yüzeye gelen ışınım değeri, performans oranı ve üretilen elektrik değerleri karşılaştırılmıştır. Çalışmada 54,6 kWp kapasite için yatayla açısı 35° azimut 0° ve 6m aralıklı olarak Konya bölgesinde çatı kurulumu için değerlendirilmiştir. Tek yüzlü panele gelen yıllık toplam 1969 kWh/m² olan ışınım değerinin beyaz zemin için %6,4, kum zemin için %2,4 ve asfalt zemin için %0,8 fazla olduğu görülmüştür. Konya bölgesinin yıllık şebekeye aktarılan enerji değerleri karşılaştırıldığında tek yüzlü panellerde 91,197 MWh iken asfalt, kum ve beyaz zemin koşullarında sırasıyla 94,404 MWh, 97,730 ve 105,690 MWh olduğu görülmüştür. Performans oranı ışınımın en fazla olduğu aylardan olan haziran ayında, beyaz zemin koşullarındaki sistemin kum zemine göre %7,0 asfalt zemine göre %10,4 tek yüzlü panel sistemine göre ise %14,5 fazla olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada çift

yüzlü panellerin farklı zemin koşullarının panel verimine ve performans oranına önemli katkı sağladığı ve proje toplam maliyetine göre az bir yatırımla uygulanabilir olduğu değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Albedo, Çift yüzlü fotovoltaik panel, Fotovoltaik panel, PVsyst, Performans oranı

1. INTRODUCTION

With the rapid development of science and technology in the world and Turkey, the energy demand is increasing. It has become inevitable for countries to seek alternatives to meet their energy needs, follow technological developments and monitor the energy sector's development. As a result of the environmental and economic effects of fossil fuels such as oil, coal, and natural gas, the energy diversity topic has focused on renewable energy sources (Allouhi et al., 2019; Çiftçi et al., 2020; Bilčík et al., 2020).

The green deal, approved in 2020, is a set of policy initiatives by the European Commission to minimize the global climate crisis and switch to net zero emissions by 2050. For this reason, using renewable energy, energy management, and efficiency increases in energy systems have gained even more importance. Solar energy systems, which have become very common today, draw attention as the fastest growing renewable source of renewable energy (Yaniktepe et al., 2017; El-houari et al., 2021). Many investments are made in solar energy systems in Turkey, especially in the Central Anatolia region. In the PV sector, which is dependent on a few manufacturers in the world, studies for the increase in efficiency in the systems are critical (Haon et al., 2019, Güven and Mete, 2021).

Only 50% of the solar radiation reaches the earth's surface by passing through the atmosphere. It is essential to use the radiation coming to the earth's surface effectively to obtain maximum efficiency from photovoltaic systems. By the way, bifacial PV panels can produce solar power from both sides of the panel.

The solar energy potential of the Europe and Turkey region is shown in Figure 1 (Bükün, 2017). It is seen that the annual radiation of 1100 kWh/m^2 in Central Europe is considerably below the value of 1700 kWh/m^2 in Turkey which means a strong advantage (Kaya et al. 2017; Bulut et al. 2018; Çetinkaya, 2017).

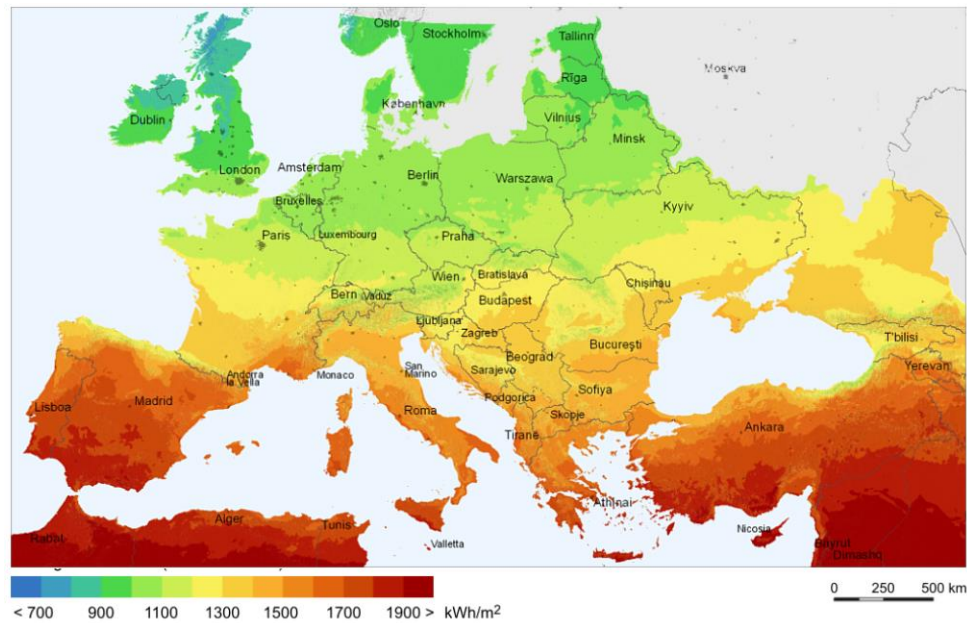


Figure 1. Annual solar radiation map of Europe (Anonymous, 2022a)

Turkey's solar energy potential is shown in Figure 2. Turkey's total daily average radiation value is 3.6 kWh/m^2 , and the sunshine duration is 7.2 hours. (Kose et al., 2019; Vekil, and Özyiğit, 2020, Sancar and Altınkaynak, 2021). The Turkish grid operator TEIAS has reported that around 992 MW of new PV systems

were connected to the grid in Turkey in the first ten months of 2021 and increased the country's cumulative installed solar power capacity to 7,658.6 MW.

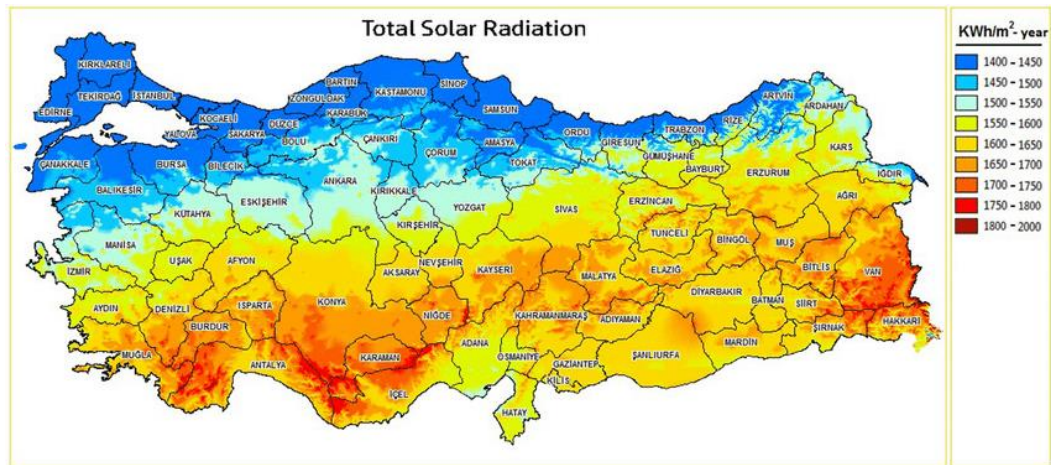


Figure 2. Turkey's annual solar energy potential map (Yılmaz et al., 2019)

The total daily average radiation duration of the Konya region is 7.94 hours, and the radiation value is 4.41 kWh/m². These values are well above Turkey's average daily radiation duration of 7.2 hours and radiation value of 3.6 kWh/m² given in Figure 3 (Solmaz et al. 2014). For this reason, Konya attracts attention as a suitable region for many roof and field PV applications (Aksoy, 2011). With the solar potential, Konya is home to the Karapınar YEKA-1 Solar power plant, Turkey's largest solar energy field with an installed area of 20 million m². When this power plant is installed, it will be one of the largest solar energy regions in the world, with a total installed power of 3,300 MW. When the project is completed, a 1-week energy need of a settlement with a population of 50 thousand will be produced in just 1 hour. In other words, it will meet the annual electrical energy needs of approximately 2 million people. In addition, 1.5 million tons of fossil waste and carbon emissions will be prevented annually.

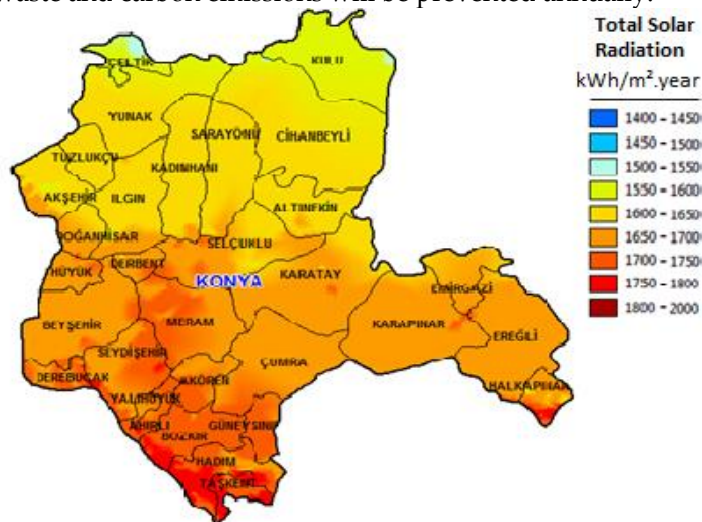


Figure 3. The solar energy potential map of the Konya region (Anonymous, 2022c)

While the solar radiation of the Konya region is 1.98 kWh/m² in January, it reaches 6.81 kWh/m² in the summer months when the electricity demand increases. It is imperative in terms of a large amount of land not suitable for agricultural use and the fact that the region is close to most electricity consumption regions (Özcan, 2019; Sadıkoğlu, 2018).

In a bifacial panel, lost and reflected light has a chance to be reabsorbed by the PV. In this application, where the light passes right through and collides with a highly reflective surface, this then bounces back

towards the panels to be converted into solar energy. The additional power generation from the transparent back surface in bifacial PV panels is mainly dependent on the ground albedo effect, the module tilt angle, and the shadow effect from the structures holding the panels and the environment. In addition, more power generation reduces the system balance costs (Lorenzo, 2021). The radiation received by the bifacial solar panels from the sun and the surfaces and a sample series are shown in Figure 4 (Mamizadeh and Aslan 2019).

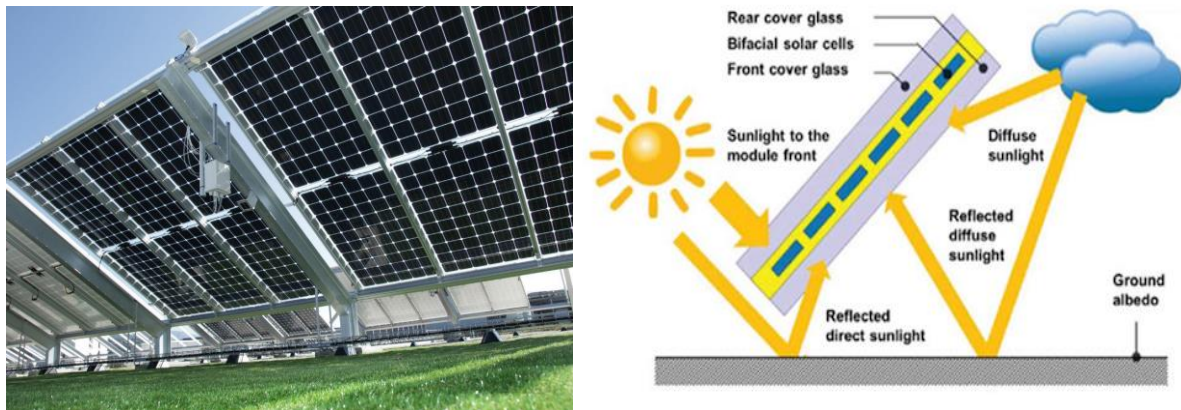


Figure 4. Bifacial PV panels (left) (Anonymous, 2022d) and representation of reflected radiation on panel surfaces (right) (Jinkosolar, 2022)

In recent years, there has been an increasing interest in bifacial PV technology as it promises a higher performance rate and lower energy cost than conventional monofacial PV applications. However, the studies are limited due to the difficulty of PV system modeling tools. Understanding the effect of different parameters, such as height, tilt angle, the reflectivity of the floor, and array size of panels, on bifacial PV system performance can help determine installation parameters for the system and provide an accurate estimation of energy efficiency (Chen et al. 2021). Some studies on the subject are given below.

Lopez-Garcia et al. (2019) examined the factors affecting the radiation reflected on the back surface of the panels in their study. He investigated the electrical performance of monofacial and bifacial PV modules under different indoor mounting configurations. They found that additional backlighting increases the electricity produced by up to 20% with current and voltage measurement in IEC TS 60904-1-2:2019 standards.

Matúš et al. (2020) investigated the effects of 25° and 90° inclination angles of monofacial and bifacial PV panels on the power balance at the Faculty of Education of Masaryk University, Czech Republic. It was stated that the annual average performance of the PV module measured with a 90° tilt angle is 30% higher than the values measured with a 25° tilt angle. In using bifacial PV panels, an efficiency increase of 7.6% was investigated.

Asgharzadeh et al. (2018) examined the effect of installation parameters and system configuration on the performance of bifacial PV arrays. They used simulation programs and laboratory measurement results with tilt angles of 5°, 35°, and 65°. Three different ground materials were used: soil, beige, and snow-covered white ground. It has been found that the optimum tilt angle for large-scale, south-facing bifacial systems is higher than monofacial systems and can increase up to 20°. In addition, with a floor albedo of 21%, the single application of PV panels was 7% higher than array efficiency.

Backside light distributions of bifacial PV modules were investigated according to the view factor models by Wang et al. (2019). The albedo gains of bifacial PV modules with an inclination angle of 30 degrees were measured as 10.50% for meadow, 22.73% for cement ground, and 38.88% for snow ground.

Eremkere et al. (2020) conducted technical, economic, and environmental analyses of bifacial PV panels. As a result of the research, the annual solar energy potential was determined as 1543 kWh/m² by

taking the module angle as 20° and the azimuth 0° . The power ratios of single-crystalline silicon, polycrystalline silicon, and amorphous silicon were calculated as 85.15% - 84.39% - 80.40%, respectively, and annual electricity production was calculated as 1219 kWh/year, 1280 kWh/year, and 1291 kWh/year, respectively.

It is seen in the literature that the studies examined in different ground conditions for bifacial PV panels are limited. In this study, bifacial PV panels on different grounds were compared with conventional monofacial PV panels in the Konya region. Solar radiation reflected on the panels, the energy production of the system, and the performance rates are presented.

2. MATERIAL AND METHOD

Simulation programs such as PVsyst, PVSOL Expert, RETScreen, Homer, and PVGIS can be used to analyze PV systems. In this study, The PVsyst, a program developed by the University of Geneva, Switzerland, to study solar systems such as grid-connected or off-grid solar systems and solar irrigation systems (Akcan et al., 2020), and also makes transferring the losses of the PV systems to the system in detail, shading with 3D drawing feature, and economic analysis possible (Bolat et al. 2020, Çınaroğlu et al. 2021), is opted because the losses can be detected, the assumed selection conditions are compatible with the literature, consistent results can be obtained between the real results.

In the study, the PV system installed on the roof of Konya Technical University Engineering and Natural Science Faculty is evaluated. The satellite view of the region and its location in the PVsyst program are shown in Figure 5. The geographical coordinates of the region are between latitude $38^\circ 1'35''$ and longitude $32^\circ 30'39''$ and the altitude is 1134 meters.

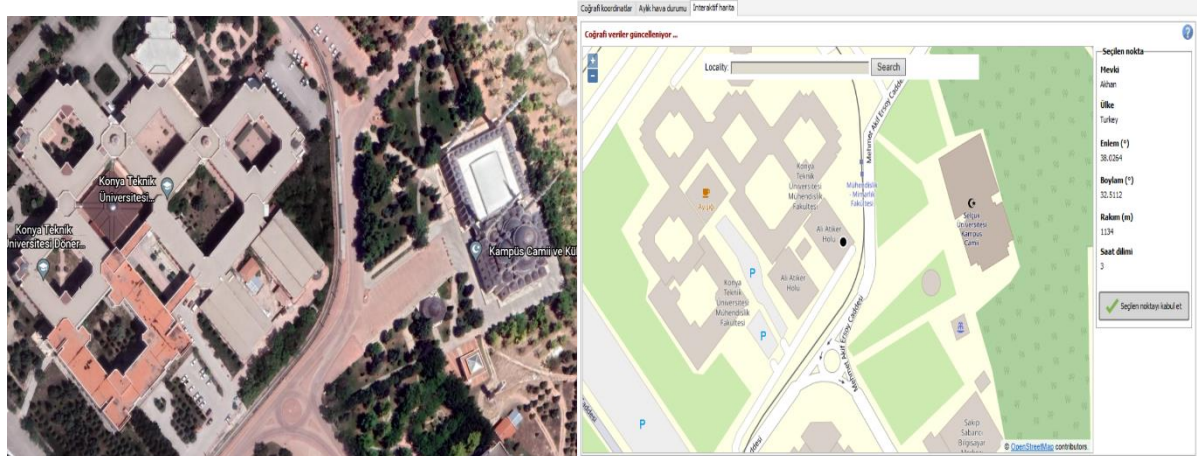


Figure 5. Satellite view of the evaluated region and its position in the PVsyst program

The rate at which the surface reflects the striking light is called as albedo effect. The albedo values of various surfaces may vary depending on the surface, color, material structure, and texture of these objects. Generally, a white object has a high albedo and reflects most of the light it hits. In contrast, a black object absorbs most of the incident radiation.

Table 1. Albedo values of different surfaces (Anonymous, 2022b).

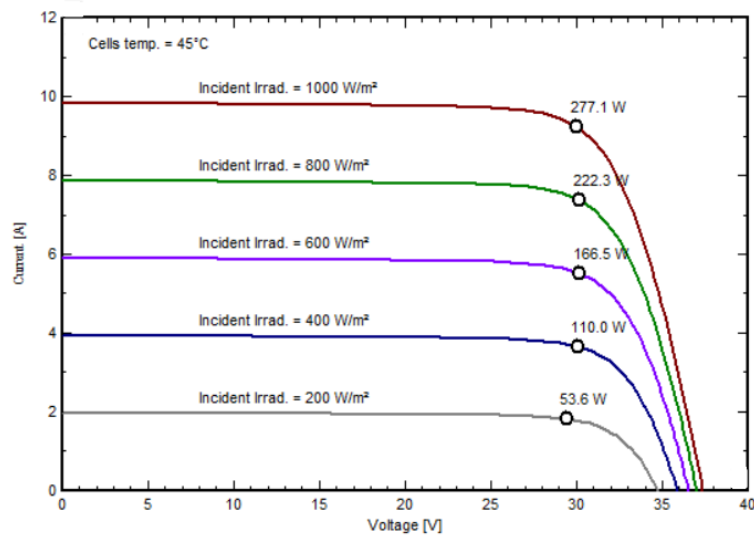
Surfaces	Albedo Value
Sea (by angle)	0,05-0,25
Forest	0,10
City	0,15
Meadow	0,20
Desert	0,30
Cloudy	0,60-0,90
Clean Snow	0,80-0,90

2.1. Features of Simulation in PVsyst

The solar azimuth angle is defined as the angle between the projection of the sun's center onto the horizontal plane and the due south direction. The distance between the panels or the feasible most extended shadow length is calculated as follows (Çikla, 2020).

$$L = a \times \left[\frac{\sin(\beta_{opt})}{\tan(23^\circ)} + \cos(\beta_{opt}) \right] \quad (1)$$

In Eq (1), L is the distance between panels or the most extended possible shadow length (m), a is the panel length to be used (m), and β_{opt} is the optimum panel tilt angle ($^\circ$). GTC Solar Turkey, GG1H-300 bifacial PERC 60 cells PV module was used in the analysis. The characteristic curve of the bifacial PV module is shown in Figure 6. The panel has a characteristic of approximately 30.7 V and 9.1 A at an irradiance value of 1000 W/m².

**Figure 6.** Bifacial PV module characteristic curve

In any grid-connected system, an inverter is required to convert direct current to alternating current. The inverter efficiency curve selected in the PVsyst program is shown in Figure 7. In the PVsyst program, the installed power is calculated as 54.6 kWp for 300 m². The number of modules is set to 180, serial modules to 30, and the power ratio to 1.08.

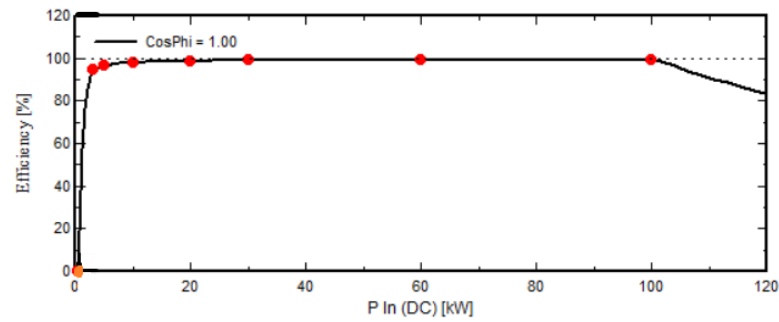


Figure 7. Inverter efficiency curve

The ground reflection is calculated as the sum of the reflection from the shaded area and the reflection from the unshaded area. The radiation in the unshaded area is modeled with global horizontal radiation (*GHI*). The radiation in the shaded area is modeled with diffuse horizontal radiation (*DHI*) and calculated as follows:

$$G_1 = \frac{\rho_g * DHI * A_1}{A_n} F_1 + \frac{\rho_g * GHI * A_2}{A_n} F_2 \quad (2)$$

Here ρ_g is the reflectivity of the floor, A_1 is the shaded area of the floor, A_2 is the unshaded area of the floor, A_n is the area of the modeled PV, F_1 is the visibility factor from the shaded area of the floor to the rear surface of the modules; F_2 is the visibility factor from the unshaded area of the floor to the rear surface of the module. The diffuse radiation is calculated with the anisotropic model;

$$G_2 = DHI * \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (3)$$

Where β is the installation slope angle of the PV module. The reflectivity of the PV modules in the back row makes a minor contribution due to the low reflectivity of the PV modules can be calculated as:

$$G_3 = \frac{\rho_m * G_m * A_m}{A_n} F_3 \quad (4)$$

Where A_m is the area of the rear PV module, ρ_m is the reflectivity of the rear PV modules, and G_m is the incident radiation in the plane of the PV module, F_3 is the visibility factor from the rear PV module to the rear surface of the module. Therefore, the total radiation received by the back surface of bifacial PV modules can be calculated as follows: (Wang et al., 2019).

$$G_{\text{rear}} = G_1 + G_2 + G_3 \quad (5)$$

The Performance Ratio (*PR*) is the ratio of the energy effectively produced with respect to the energy produced if the system was continuously working at its nominal STC efficiency, defined in the norm IEC EN 61724. In the Grid-connected systems, the available energy is defined as E_{Grid} . The energy potentially produced at STC conditions is equal to multiplication of G_{GlobInc} and P_{nomPV} , where P_{nomPV} is the STC installed power. Therefore for a grid-connected system, the *PR* can be calculated as below.

$$PR = E_{\text{Grid}} / (G_{\text{GlobInc}} * P_{\text{nomPV}}) \quad (6)$$

For bifacial PV Systems, the bifacial contribution from the rear side of the PV modules will become a gain, increasing the *PR*. The revised IEC 61724 -1 standard introduces the concept of a bifacial *PR*. The basic idea is that the additional irradiance contribution on the rear side of the PV modules is added to the Global incident irradiance. In PVsyst, to calculate the bifacial *PR*, the rear side irradiance is approximated

as the difference between G_{GlobBak} and $Back_{\text{Shd}}$, where G_{GlobBak} is the effective irradiance on the rear side of the PV modules, and $Back_{\text{Shd}}$ are the losses induced by the 'Structure shading factor' in the bifacial model definitions. The bifacial PR_{bf} becomes;

$$PR_{\text{bf}} = PR / (1 + (G_{\text{GlobBak}} - Back_{\text{Shd}}) / (G_{\text{GlobInc}})) \quad (7)$$

The following processes are used to simulate in PVsyst. A flowchart of the PVsyst simulation of the suggested grid-connected project is shown in Figure 8.

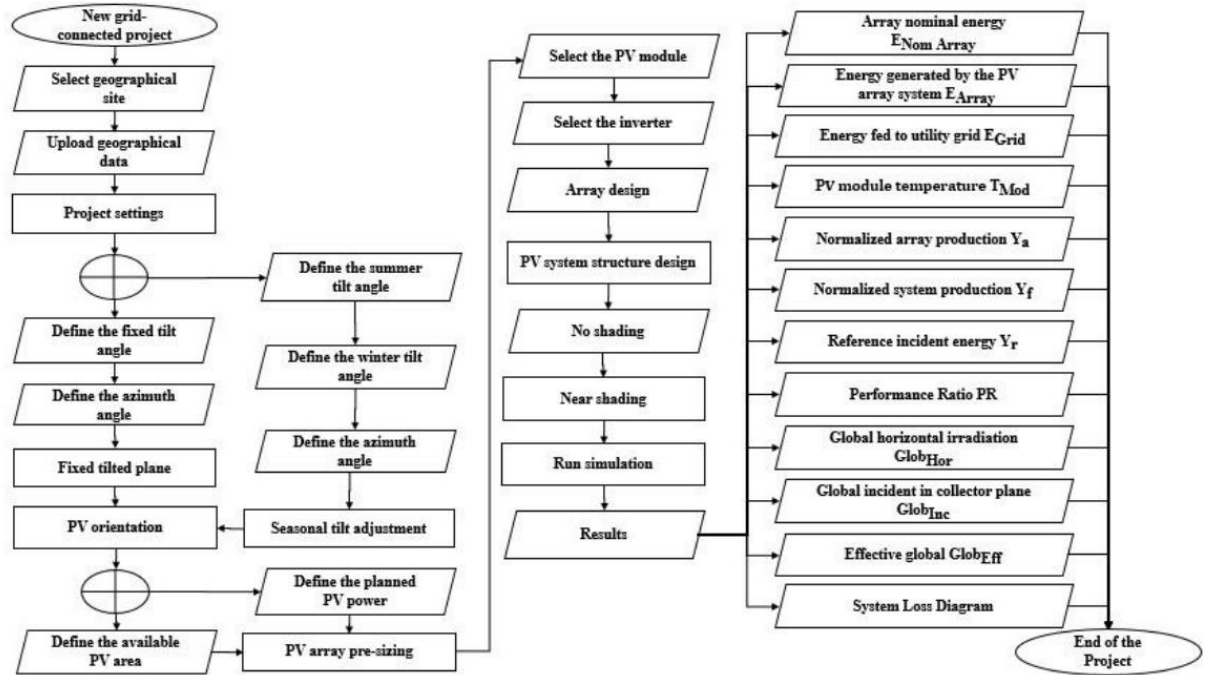


Figure 8. A flowchart of the PVsyst simulation of the proposed grid-connected system (Abagy et al., 2021)

In this study an installed capacity of 54,6 kWp bifacial and monofacial PV panels with a horizontal angle of 35°, azimuth angle of 0°, and 6m intervals for roof installation is considered (PVsyst, 2020). GTC Solar Turkey, GG1H-300 bifacial PERC 60 cells PV module was used in the analysis. Albedo values of the grounds of white sand and asphalt grounds are taken as 80%, 30% and, 10%.

3. RESULT AND DISCUSSION

The monthly variation of the global horizontal irradiation and horizontal diffuse irradiation values for the Konya region are given in Table 2. Climatic conditions and radiation values are considered the same for all analyzes. The annual total radiation value for the region is calculated as 1754.7 kWh/m². It is seen that the 594.3 kWh/m² of the total radiation is the diffuse radiation. The Linke turbidity factor, an indicator of the number of clean, dry atmospheres that would be necessary to attenuate the extraterrestrial radiation produced by the atmosphere (Chabane et al., 2021), is also calculated and given in Table 2.

Table 2. Solar radiation and climate conditions of the Konya region

	Glob. Hor. irradiation (kWh/m²)	Hor. Diff. irradiation (kWh/ m²)	Temp. (°C)	Wind speed (m/s)	Linke turbidity [-]	Relative humidity (%)
January	69,2	28,60	-0,20	3,0	2,62	80,6
February	87,3	36,6	1,80	3,39	2,93	74,3
March	131,0	47,8	6,80	3,80	3,41	60,3
April	166,1	69,8	11,10	3,69	3,91	54,3
May	210,6	73,7	16,20	3,50	3,55	52,3
June	223,3	62,9	20,70	4,10	3,17	44,3
July	229,2	68,0	24,70	4,60	3,13	35,2
August	208,4	56,8	24,40	4,40	3,09	35,1
September	169,6	47,5	19,30	3,60	2,92	41,5
October	119,2	41,3	13,40	3,21	2,99	56,1
November	78,4	31,0	6,60	2,70	2,74	68,7
December	62,4	30,30	1,50	2,69	2,60	80,3
Year	1754,7	594,3	12,20	3,60	3,09	56,9

Table 3. Monthly values obtained on asphalt ground for Bifacial PV Panels and monofacial panels in the Konya region

Months	Bifacial on Asphalt Ground					Monofacial PV				
	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR
1	111,9	106,9	5,72	5,648	0,935	111,2	106,7	5,579	5,508	0,917
2	124,2	119,6	6,34	6,268	0,935	123,4	119,3	6,159	6,088	0,914
3	162,4	157,1	8,061	7,964	0,908	161,2	156,6	7,808	7,714	0,886
4	176,4	168,9	8,626	8,526	0,895	174,9	168,3	8,317	8,221	0,87
5	198,3	189,8	9,509	9,397	0,878	196,4	188,9	9,122	9,013	0,85
6	198,2	189,7	9,327	9,22	0,862	196,1	188,7	8,905	8,799	0,831
7	207,8	198,6	9,58	9,469	0,844	205,7	197,7	9,156	9,047	0,814
8	213,6	205,7	9,764	9,647	0,836	211,7	204,9	9,432	9,318	0,815
9	200,6	193,9	9,364	9,257	0,854	199,1	193,3	9,084	8,981	0,835
10	164,8	159,9	7,992	7,898	0,887	163,8	159,5	7,766	7,674	0,868
11	124,4	118,8	6,129	6,057	0,902	123,7	118,5	5,978	5,908	0,885
12	102,2	95,6	5,115	5,052	0,915	101,7	95,4	4,987	4,926	0,897
Total	1984,9	1904,2	95,527	94,404	0,881	1969	1897,9	92,294	91,197	0,858

The global radiation coming to the collector, the energy transferred to the grid, and the performance ratios were calculated and compared for Bifacial PV panels on white, sand, asphalt ground conditions and monofacial PV panels in the same conditions for the Konya region and given in Table 3 and 4. The result of the transposition from horizontal radiation to tilted PV plane of the global Incident radiation (GlobInc) for monofacial panels was found to be 1969.0 kWh/m², while bifacial panels on asphalt, sand floors, and white grounds were found to be 1984.9 kWh/m², 2016.6 kWh/m² and 2095.9, respectively. The Effective global Radiation (GlobEff) on the panels is the GlobInc, affected by the optical losses like far and linear shadings, IAM, and soiling losses. In this study, The Effective global Radiation (GlobEff) found 1897,9 kWh/m² for monofacial PV, 1904,2 kWh/m² for bifacial PV on asphalt, 1916,7 kWh/m² for bifacial PV on

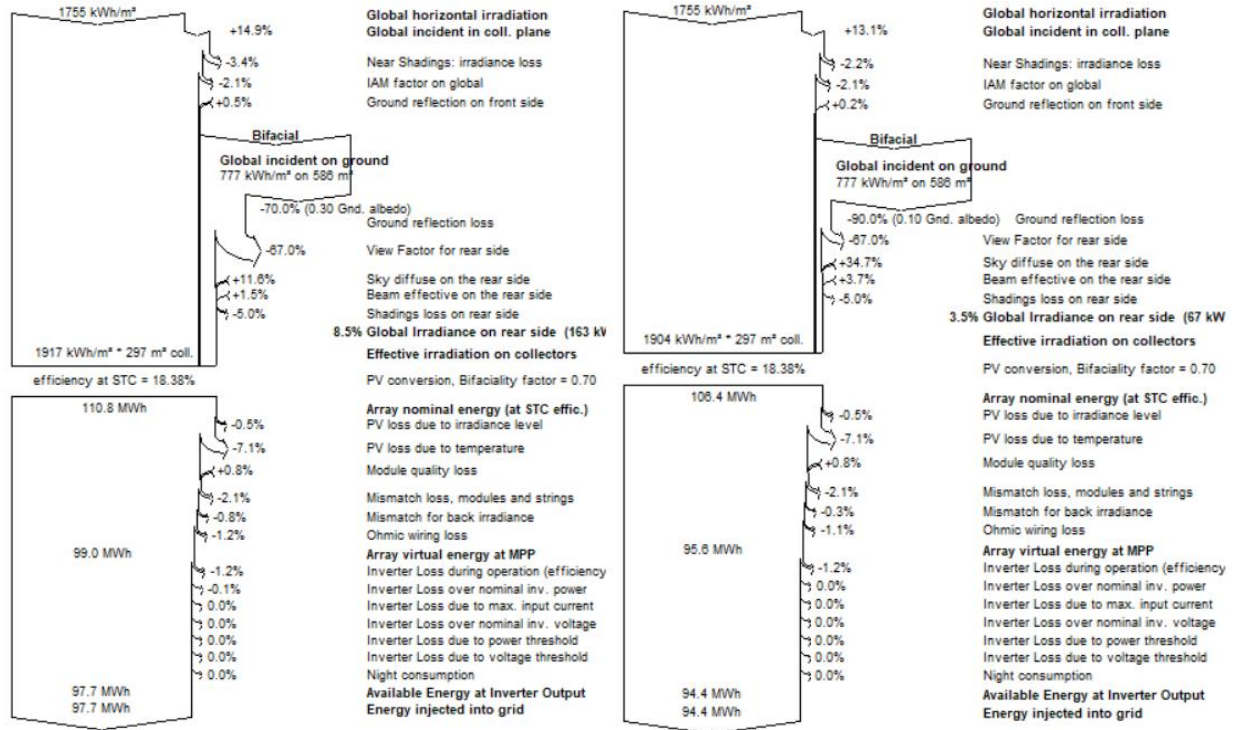
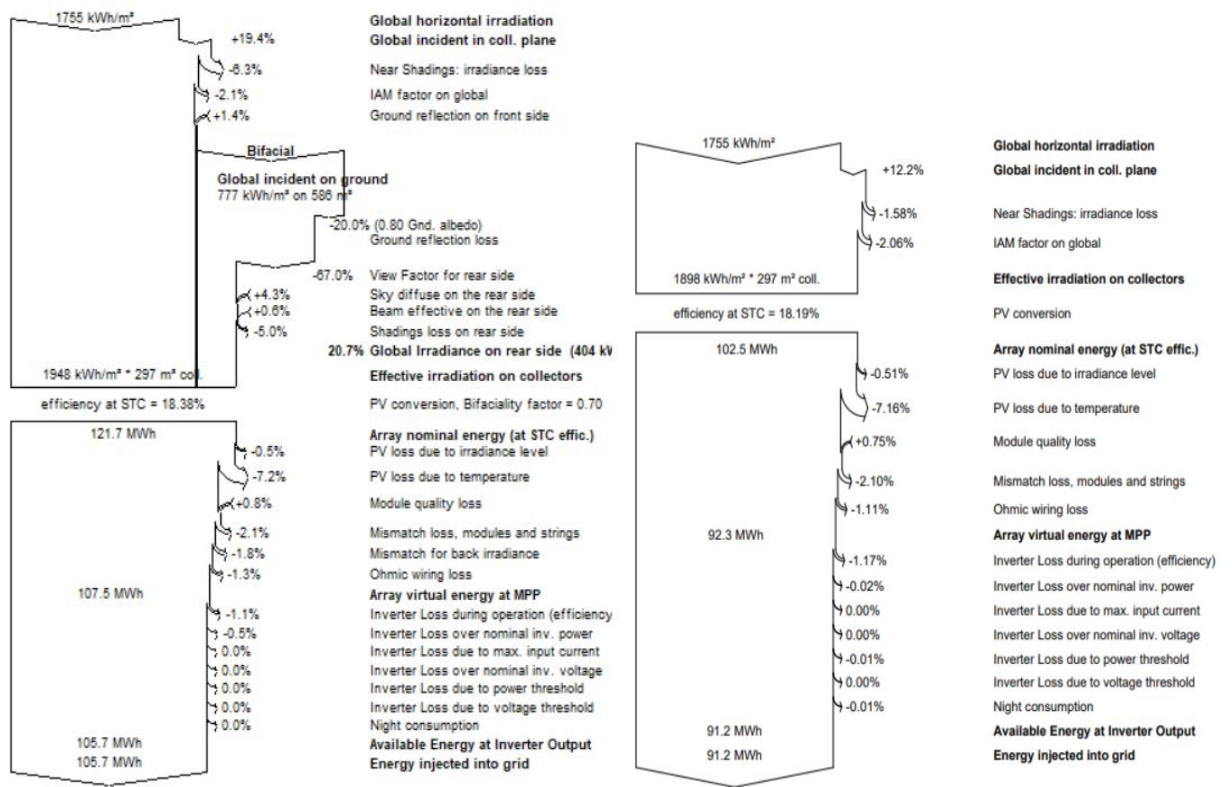
the sand, and 1948,1 kWh/m² for bifacial PV on white ground conditions. It has been observed that the irradiance values are highly dependent on the albedo of the ground. It is also found that the global radiation values reflected to the collector surface increase in the summer months. The maximum annual average PR was found as 0.934 for bifacial on the white ground, whereas the others were below 0.9.

Table 4. Monthly values obtained on the white and sand ground for Bifacial PV Panels in the Konya region

Months	Bifacial on White Ground					Bifacial on Sand Ground				
	Glob Inc kWh/m ²	Glob Eff kWh/m ²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR
1	116,2	108,2	6,05	5,98	0,952	113,1	107,2	5,82	5,74	0,94
2	129,7	121,4	6,88	6,8	0,97	125,8	120,1	6,5	6,42	0,946
3	170,7	160,1	8,87	8,77	0,951	164,7	157,9	8,31	8,21	0,922
4	187	173,1	9,71	9,6	0,951	179,4	170,1	8,95	8,85	0,913
5	211,6	195,6	11,03	10,9	0,954	202,1	191,4	9,96	9,84	0,902
6	212,3	196,1	11,04	10,92	0,952	202,2	191,5	9,83	9,72	0,89
7	222,3	205,1	11,27	11,14	0,928	211,9	200,5	10,07	9,96	0,87
8	226,8	211,1	11,1	10,97	0,895	217,4	207,2	10,16	10,03	0,855
9	211,4	197,9	10,35	10,23	0,897	203,7	195	9,66	9,55	0,868
10	172,4	162,5	8,71	8,6	0,924	167	160,6	8,21	8,11	0,899
11	129,4	120,3	6,52	6,44	0,922	125,8	119,2	6,24	6,17	0,908
12	106,2	96,7	5,39	5,33	0,93	103,4	95,9	5,19	5,13	0,919
Year	2095,9	1948,1	106,93	105,69	0,934	2016,6	1916,7	98,89	97,73	0,897

In the PVsyst simulations, the loss diagram of the bifacial PV panel on the white floor and monofacial PV panels installed in the Konya region are presented in Figure 9, and the losses in the bifacial PV panel on the Asphalt ground and sand ground are presented in Figure 10. All systems' annual total radiation value was calculated as 1755 kWh/m². The albedo of the white floor was taken as 80%, and the global radiation reflected on the floor was formed as 777 kWh/m² in 586 m². It is found that Array nominal Energy is 121.7 MWh for bifacial PV panels on the white ground and 102.5 MWh for monofacial PV panels. When the losses are subtracted, we see that the energy transferred to the grid is 105.7 MWh for the white ground, while it is 91.2 MWh for the monofacial PV panel. The temperature has a significant effect on PV efficiency with a value of 7%.

It is shown in Figure 10 that the albedo values of the sand and asphalt are 30% and 10%. It is seen that albedo has a significant effect on the reflectivity of the total global radiation of 777 kWh/m² to the back surface of the Bifacial PV (BF PV) and monofacial PV panels. Array nominal energy values were found to be 110.8 MWh for sand ground and 106.4 MWh for asphalt ground. After all losses, the energy transferred to the grid is 97.7 MWh for sand ground and 94.4 MWh for asphalt ground.



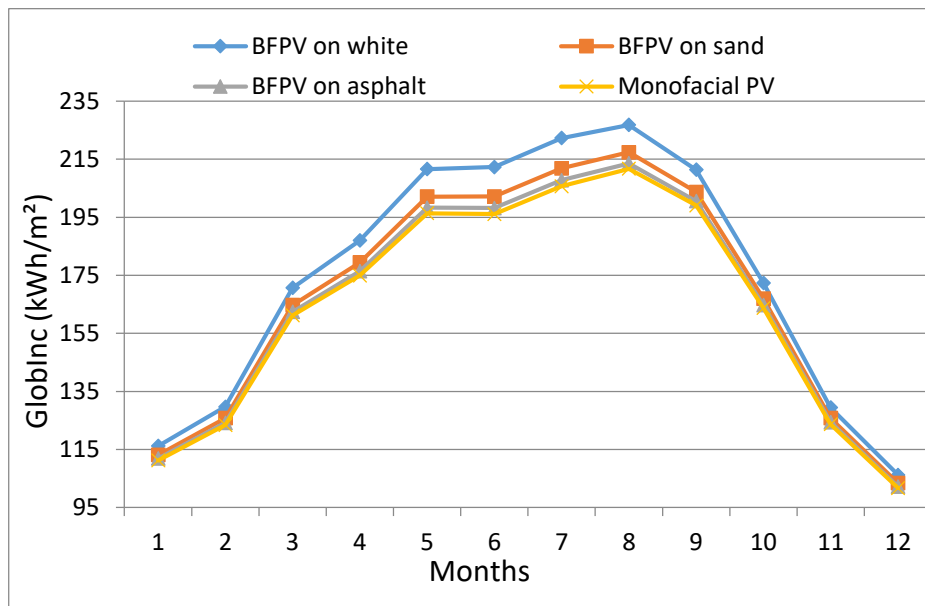


Figure 11. Monthly radiation reflected to PV surfaces

In Figure 11, the variation of global irradiance for bifacial PV panels and monofacial PV on different ground conditions (white, sand, asphalt) for the Konya region is given. Radiation values are low in winter and increase in summer. In August, which is one of the months with the highest radiation, 226.8 kWh/m² radiation value was obtained was 217.4 kWh/m² for the white, 213.6 kWh/m² for asphalt, and 211.7 kWh/m² for monofacial PV panels. The radiation obtained on the white background was 7.1% higher than the monofacial PV panel in August. It has been observed that different ground conditions are quite effective on the radiation formed on the back surfaces of the PV panels. The radiation incident on the monofacial panel is calculated by converting the horizontal radiation to the incident of the plane.

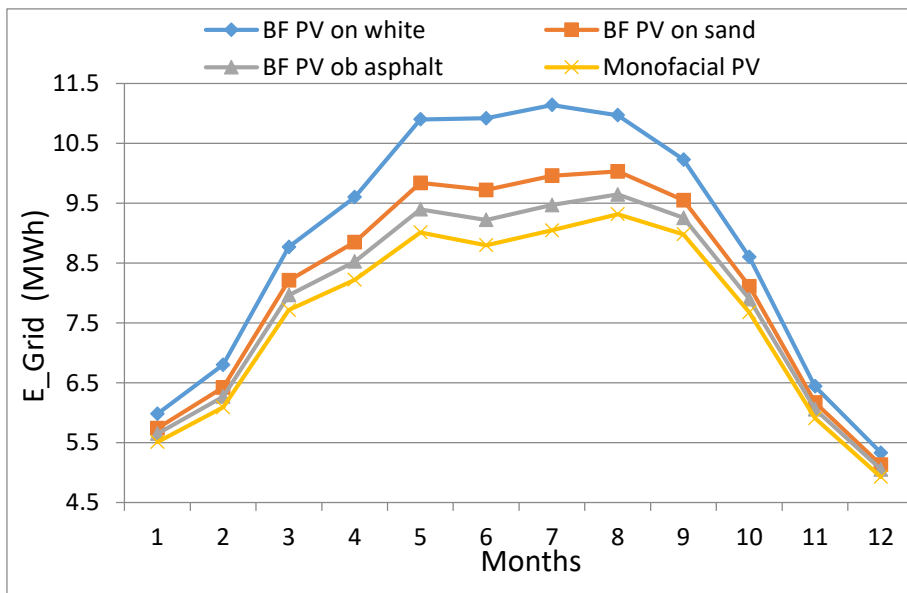


Figure 11. Energy Transferred to the Grid by Months for different PV panels and ground conditions

The monthly variation of electricity generation of bifacial and monofacial PV panels in different ground conditions for the Konya region according is given in Figure 12. It was observed that energy transferred to the grid by bifacial PV panels installed on the white floor in July is 23.1% more than the monofacial PV panels. While the annual energy transferred to the grid is 105.69 MWh by Bifacial PVs on

white background, it is 91,197 MWh at monofacial panels. The annual energy transferred to the grid by the Bifacial PV system installed on the white ground is 15.9% higher than the monofacial PV systems. It is also seen that the energy production value of Bifacial PV panels installed on sand and asphalt surfaces is higher than monofacial panels. However, it is pretty low compared to the white ground.

The PR values of bifacial and monofacial PV panels installed in different ground conditions in the Konya region are given in Figure 13. According to the annual average values, the PR value of bifacial panels is 0.934 for the white floor, 0.897 for the sand floor, and 0.881 for the asphalt floor. Furthermore, the PR value for monofacial panels was calculated as 0.858. The performance ratio of bifacial PV panels installed on the white floor was 0.928 in July, which is 14% higher than 0.814 for monofacial panels. The most significant difference between the white floor and the monofacial PV panel occurred in June. When the annual average performances of bifacial on the white floor and monofacial PV panels are examined, it is seen that the PR value of the white floor is 8.8% higher.

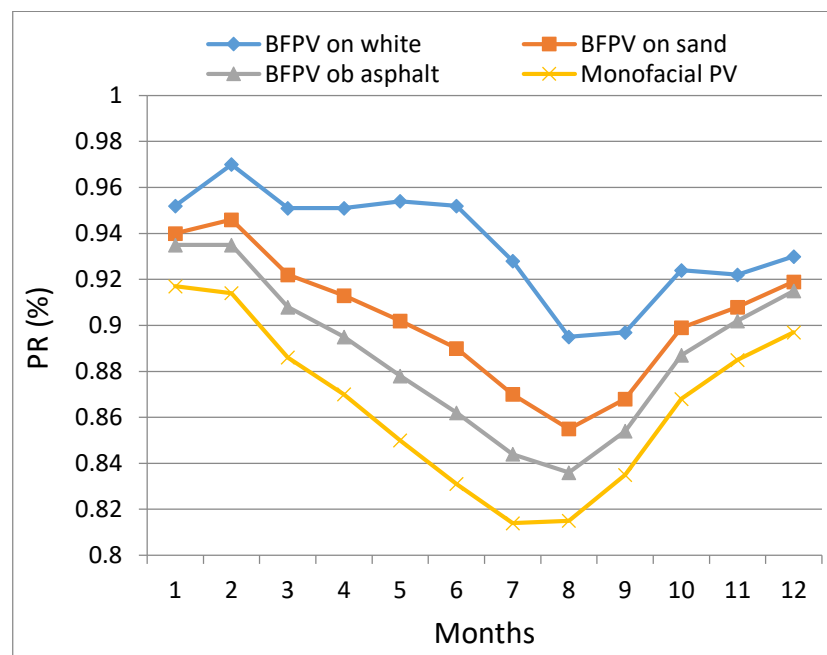


Figure 13. PR values for bifacial and monofacial PV panels

4. CONCLUSION

In this study, bifacial PV panel applications under different ground conditions were compared with monofacial PV panels in Konya region. Although there are many studies on modeling photovoltaic systems, studies modeling the comparison of monofacial and bifacial PV panels are very limited. Solar radiation reflected on the panels, energy production of the system, and the performance rates are presented.

- The annual total radiation value for the region is calculated as 1754.7 kWh/m². It is seen that the 594.3 kWh/m² of the total radiation is the diffuse radiation.
- The Bifacial system on white ground is the best choice compared to the sand and asphalt ground conditions with an 80% albedo effect.
- The yearly total energy production is 121.7 MWh for bifacial PV panels on the white ground and 102.5 MWh for monofacial PV panels.
- The energy transferred to the grid is 105.7 MWh for the white ground, while it is 91.2 MWh for the monofacial PV panel.
- The annual energy transferred to the grid by the Bifacial PV system installed on the white ground is 15.9% higher than the monofacial PV systems.

The performance of the models used in the PVsyst program can be compared by conducting the current study experimentally and comparing the results with the simulations. In addition, a techno-economic analysis can be done in future studies. In this study, the panel heights were assumed to be constant. The effect of the height of the PV panels on the efficiency can also be examined. The effects of the azimuth angle, another parameter, can also be evaluated. In addition, by modeling other variables with an optimization algorithm, optimum installation conditions can be determined in different regions and conditions. The study can also be repeated for different provinces, and the results can be compared in different coordinates.

REFERENCES

- Abagy, A., Emeara, M., AbdelGawad, A. 2021. "Orientation-Optimization Simulation for Solar Photovoltaic Plant of Cairo International Airport" *The Egyptian International Journal of Engineering Sciences and Technology*, 33, 45-68.
- Akcan, E. Kuncan. M., Minaz. M. R. 2020, "PVsyst yazılımı ile 30 kW şebekeye bağlı fotovoltaik sistemin modellenmesi ve simülasyonu", *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (18), 248-261.
- Aksoy, M. H., 2011, "Güneş ve rüzgâr enerjisi ile çalışan su pompalama sisteminin deneysel incelenmesi", The Graduate School of Natural and Applied Science of Selçuk University The Master's thesis In mechanical Engineering.
- Allouhi, A., Buker, M. S., El-Houari, H., Boharb, A., Amine, M. B., Kousksou, T., Jamil, A. 2019, "PV water pumping systems for domestic uses in remote areas: Sizing process, simulation and economic evaluation" *Renewable Energy*, 132, 798-812.
- Anonymous, 2022a, Solar resource map Solargis. Solar resource maps of Europe. Available: <https://solargis.com> [20.06.2022].
- Anonymous, 2022b, Available: <http://climatechange.boun.edu.tr/albedo-nedir/> [20.06.2022].
- Anonymous, 2022c, Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Haritası. <https://www.enerjiatlası.com/gunes-enerjisiharitasi/turkiye>. Available: 2021-03-28
- Anonymous, 2022d, Available: <https://www.pv-magazine.com/2020/06/11/french-bifacial-standards-measure-up/>
- Asgharzadeh, A., Marion, B., Deline, C., Hansen, C., Stein, J. S., & Toor, F. 2018, "A sensitivity study of the impact of installation parameters and system configuration on the performance of bifacial PV arrays", *IEEE Journal of Photovoltaics*, 8(3), 798-805.
- Bilćik, M., Božiková, M., Kotoulek, P., Kišev, M., Csillag, J., Petrović, A. 2020, "Comparison of the annual power balance of photovoltaic modules" *Journal on Processing and Energy in Agriculture*, 24(1), 18-21.
- Bolat, M., Arifoğlu, U., Demiryürek, H. K. 2020, "Lebit enerji güneş santralının PVsyst programı ile analizi" *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(3), 1351-1363.
- Bükün, N., 2017, "Siirt yöresi için tek eksenli güneş takip sistemli güneş panellerinin enerji verimliliğinin incelenmesi" Master's thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences.
- Bulut N., Kuncan M., Horoz S., "Türkiye'de güneş enerjisinin kullanım alanları ve Siirt güneş enerji potansiyeli" Ahtamara 1st International Multidisciplinary Studies Congress Proceedings Book, Gevaş, Van-Türkiye, 2018.
- Çetinkaya, N., 2017, "Improving of renewable energy support policy and a performance analysis of a grid-connected 1 MWP PV power plant in Konya" *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(3), 251-261.
- Chabane, F., Moummi, N., & Brima, A. 2021, "A New Approach to Estimate the Distribution of Solar Radiation Using Linke Turbidity Factor and Tilt Angle" *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 45(2), 523-534.
- Chen, M., Zhang, W., Xie, L., He, B., Wang, W., Li, J., Li, Z., 2021, "Improvement of the electricity performance of bifacial PV module applied on the building envelope", *Energy and Buildings*, 238, 110849.

- Çiftçi, S., Solak, M., Kuncan, M., 2020, "Powered by the sun: designing and analyzing technical and economic aspects of a school sustained by photovoltaics" *Journal of Mechatronics and Artificial Intelligence in Engineering*, 1(1), 21-32.
- Çikla, R. ,2020, "Samsun ilinde kurulu şebekeye bağlı bir güneş enerji santralinin performansına gölgelenme etkisinin incelenmesi" Master's thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences.
- Çınaroğlu. M. S., 2021, "Şebekeye Bağlı Üç Adet Fotovoltaik Enerji Santralının PVsyst Programı ile Analizi; Kilis Örneği" *El-Cezeri*, 8 (2), 675-687.
- Dağtekin, M., 2012, "Etlik Piliç Kümeslerinin Serinletilmesinde Güneş Enerjisi Kullanımının Tekno-Ekonomik Analizi" *Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 27(2), 11-20.
- El-houari, H., Allouhi, A., Buker, M. S., Kousksou, T., Jamil, A., El Amrani, B. 2021, "Off-Grid PV-Based Hybrid Renewable Energy Systems for Electricity Generation in Remote Areas" *In Advanced Technologies for Solar Photovoltaics Energy Systems* pp. 483-513, Springer, Cham.
- Eremkere, M. Aktaş. T. 2020, "Tekirdağ Bağcılık Araştırma Enstitüsü Üzüm Suyu İşleme Tesis Çatısına Uygulanabilecek Fotovoltaik Tasarımların Teknik. Ekonomik ve Çevresel Açılardan Analizi" *El-Cezeri*, 7 (1) 275-294 .
- Güven, A. F. Mete, M. 2021, "Balıkesir İli Erdek İlçesi İçin Bağımsız Hibrit Enerji Sisteminin Fizibilite Çalışması Ve Ekonomik Analizi" *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi* , 9 (4) , 1063-1076 .
- Haon, P., Öztürk, A., Hajun, P., Khan, M. U., 2019, "Utilization of robotics for solar panel cleaning and maintenance" *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(4), 768-775.
- Jinkosolar, 2022, available: <https://www.jinkosolar.com/uploads/5f0ed852/Swan%20Brochure.pdf> [20.12.2021].
- Kaya, M. N., Aksoy, M. H., Kose, F., 2017, "Renewable energy in Turkey: potential, current status and future aspects" *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*, 15(1), 65.
- Kose, F., Aksoy, M. H., Ozgoren, M., 2019, "Experimental investigation of solar/wind hybrid system for irrigation in Konya, Turkey" *Thermal Science*, 23(6 Part B), 4129-4139.
- Lopez-Garcia, J., Casado, A., Sample, T., 2019, "Electrical performance of bifacial silicon PV modules under different indoor mounting configurations affecting the rear reflected irradiance" *Solar Energy*, 177, 471-482.
- Mamizadeh, S., Aslan, Z. 2019, "Yapay sinir ağları ile yüzey sıcaklık ve albedo modellemesi" *AURUM Journal of Engineering Systems and Architecture*, 3(2), 227-241.
- PVsyst, 2020. <https://www.pvsyst.com/help/>:
- Sadıkoglu, F. 2018, "1 MWp şebekeye bağlı güneş enerjisi santrali performans analizi" Doctoral Thesis, Necmettin Erbakan University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Energy Engineering.
- Sancar, M. R., Altınkaynak, M. 2021, "Isparta İli İçin Farklı Çatı Tiplerinde Tasarlanan Fotovoltaik Sistemlerin Karşılaştırılması" *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (32), 1024-1028.
- Solmaz, O., Ozgoren, M., Aksoy, M. H. 2014, "Hourly cooling load prediction of a vehicle in the southern region of Turkey by Artificial Neural Network" *Energy Conversion and Management*, 82, 177-187.
- Vekil, S., Özyiğit, F. Y. 2020, "Sivas ilinin farklı ilçelerinde şebeke bağlantılı güneş enerji santrallerinin tasarımı ve analizi" *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (20), 425-437.
- Wang, L., Liu, F., Yu, S., Quan, P., Zhang, Z., 2019, "The Study on Micromismatch Losses of the Bifacial PV Modules Due to the Irradiance Nonuniformity on Its Backside Surface" *IEEE Journal of Photovoltaics*, 10(1), 135-143.
- Yaniktepe, B., Kara, O., Ozalp, C., 2017, "The global solar radiation estimation and analysis of solar energy: case study for Osmaniye, Turkey" *International Journal of Green Energy*, 14(9), 765-773.
- Yilmaz, M., Kayabasi, E., Akbaba, M. 2019, "Determination of the effects of operating conditions on the output power of the inverter and the power quality using an artificial neural network" *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 22(4), 1068-1076.



KAVİTE ÇIKIŞ KENARININ GÜRÜLTÜ SEVİYESİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

¹Sercan YAĞMUR , ²Sercan DOĞAN 

Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konya,
TÜRKİYE

¹syagmur@ktun.edu.tr, ²sercandogan@ktun.edu.tr

Geliş/Received: 21.04.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 27.07.2022

ÖZ: Çalışmada, dikdörtgen kesitli kavite içinde akan akış nedeniyle oluşan gürültü seviyesi ve kavite etrafındaki akış yapıları sayısal olarak incelenmiştir. Araştırma bulgularına göre kavite kesitinde değişiklikler yapılarak gürültü seviyesinin azaltılması amaçlanmıştır. Öncelikle, dikdörtgen kesitli kavite uygulaması için sayısal analizler yapılarak elde edilen akış yapısı sonuçları literatürdeki çalışmalarla doğrulanmıştır. Daha sonra, en yüksek gürültü seviyesinin olduğu kavite çıkış kenarı için $r/h=0.1, 0.2, 0.5, 0.75$ ve 1.0 çap oranlarında beş farklı geometri tasarlanmıştır ve bu geometriler için sonuçları doğrulanan SST $k-\omega$ türbülans modeli ile $10-35$ m/s hız aralığında sayısal analizler yapılmıştır. Dikdörtgen kesitli ve çıkış kenarı beş farklı çap oranı ile tasarlanmış kavite akış sonuçları görsel ve sayısal veriler halinde sunulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre özellikle artan çap oranı ile gürültü seviyesinde azalma tespit edilmiştir. Artan çap oranıyla tüm hızlar için gürültü seviyelerinde en yüksek %26 en düşük %15 oranında azalmalar gözlemlenmiştir. Çalışma sonuçları, uygulamada kullanılan kavite geometrilerinin tasarımına bağlı olarak gürültü seviyesinin azaltılmasında araştırmacılar için yol gösterici nitelikte olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Desibel, Gürültü Seviyesi, HAD, Kavite, SST $k-\omega$

Investigation of the Effect of Cavity Trailing Edge on Noise Level

ABSTRACT: In this study, the noise level caused by the fluid flow in the rectangular cavity and the flow structures around the cavity were numerically investigated. According to the findings, it aims to reduce the noise level by making changes in the cavity section. First, the results of the flow structure obtained by performing numerical analysis for the rectangular-section cavity application were validated by the studies in the literature. Then, five different geometries with diameter ratios of $r/h=0.1, 0.2, 0.5, 0.75$ and 1.0 were designed for the trailing edge of the cavity where the highest noise level occurs and for these geometries, numerical analyzes were done with the SST $k-\omega$ turbulence model, the results of which were validated, at the range of $10-35$ m/s uniform velocity. Cavity flow results designed with rectangular cross-section and five different diameter ratios on the trailing edge are presented as contours and numerical data. According to the results obtained, a decrease in the noise level was determined, especially with the increasing diameter ratio. With an increase in diameter ratio, noise levels decreased in the range of $15\%-26\%$ for all cases. The results are recommendations for researchers in reducing the noise level depending on the design of the cavity geometries used in practice.

Keywords: Cavity, CFD, Decibel, Noise Level, SST $k-\omega$

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Katı yüzeyler üzerindeki boşluk veya oyuklar üzerinden geçen akış olarak tanımlanan kavite akışları, son yıllarda birçok araştırmacı tarafından incelenen akışkanlar mekaniğinin temel konularındandır. Kavite geometrisi küt bir tasarımda olması nedeniyle etrafında karmaşık bir akış

yapısı oluşmaktadır. Bu durum, basınç, hız, yoğunluk ve ses seviyelerinde değişimlere neden olabilmektedir. Uçak iniş takımları, denizaltı araçlar, trenlerdeki körük bağlantıları, otomobillerde açılan cam ve tavan uygulamaları gibi çeşitli aerodinamik ve hidrodinamik yüzeylerde kasıtlı veya tesadüfi olarak kaviteleer ile sıklıkla karşılaşılabilir. Bu tür kavite yüzeyleri kompleks akış yapısına bağlı olarak yüksek sürtünme kuvveti, gürültü ve titreşime neden olmaktadır (Özsoy ve Aslan, 2011).

Mach sayısı (Ma) ve Reynolds sayısı (Re) gibi parametreler kavite geometrisi (h/L) üzerinden ayrılan akışın yapısını önemli ölçüde etkilemektedir. Kavite içerisindeki kararsız akış yapısı nedeniyle kavite giriş kenarından kopan girdaplar, kavite çıkış kenarına çarparak güçlü akustik dalgalanmalara sebep olmaktadır (Rockwell ve Naudascher, 1978). Bu nedenle karmaşık akış yapısının zamana bağlı değişiminden kaynaklanan rahatsız edici gürültünün, özellikle gürültü oluşturan yüzey üzerinde yapılan değişiklikler ile sonlandırılması önemli araştırma alanlarından biri olmuştur. Literatürdeki çalışmaların birçoğu sonik ve süpersonik hız seviyelerinde yapılmıştır. Buna karşın düşük Ma sayısında sıkıştırılmaz akış yapısı için yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Krishnamurthy (1955), kavite derinliğinin sabit olduğu Ma sayısının 0.2–1.5 aralığında farklı kavite uzunluklarında yapmış olduğu deneylerde; kaviteye bağlı olarak meydana gelen akustik basınç dalgalanmalarının, sınır tabaka bölgesindeki akış yapısına (laminer veya türbülanslı), kavite boyutlarına ve Ma sayısına bağlı olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, akustik dalgalanma şiddetinin laminer akış şartlarında türbülanslı duruma göre daha yüksek çıktığı ve bu durumun Ma sayısının artmasına da bağlı olduğunu belirtmiştir. Chen ve diğ. (2014) yapmış oldukları deneysel çalışmada, Re sayısının sabit derinlik boy oranına sahip dikdörtgen kavitedeki akış yapısına etkisini Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme (PIV) yöntemiyle incelemişlerdir. Kavite bölgesindeki akış yapısı üzerinde Re sayısı değişiminin etkili olduğunu ve artması ile Re gerilmelerinin arttığını belirlemişlerdir.

Sciacchitano ve diğ. (2021) uzunluk derinlik oranının 8.4 olduğu kavite akışı $Re=6.3-19 \times 10^3$ aralığında PIV yöntemi ile incelemiştir. Ayrıca, standart ve SST k- ω türbülans modelini kullandıkları sayısal analiz sonuçları ile kıyaslamışlardır. Hem deneysel hem de sayısal analiz sonuçlarında giriş ve çıkış kenarına yakın bölgelerde ikincil girdap bileşenlerinin oluştuğu görülmüştür. Çıkış kenarı bölgesinde ise türbülans kinetik enerji değerinin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca deneysel sonuçlar ile kıyaslandığında, SST k- ω türbülans modeli sonuçlarının standart k- ω sonuçlarına göre daha uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Noger ve diğ. (2000) hızlı trenlerin üstünde yer alan elektrik direklerinin yerleştirildiği dikdörtgen kesitli kavite bölgesinin aerodinamik ve akustik özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir ve kavite çıkış bölgesinin büyük bir gürültü kaynağı olduğunu belirlemişlerdir. Akış hızının arttıkça ses şiddetinin arttığını ve yüksek ses şiddetinin daha yüksek frekanslarda gerçekleştiğini belirlemişlerdir. Ayrıca kavite ön kenarından gelen kayma tabakası ile kavite içerisindeki etkileşim nedeniyle kavite aşağı akış bölgesinde daha yüksek türbülans yoğunluğu tespit etmişlerdir.

Literatürde yapılan çalışmalarda, akustik probleminin üstesinden gelmek için en sıklıkla kullanılan yöntemler genellikle pasif akış kontrol yöntemleridir. Bu yöntem ile kavite akış ön duvarında ve arka duvarında yapılan geometrik değişiklikler ile akustik, basınç ve titreşim kaynaklı durumlar kontrol edilmektedir. Zhang ve diğ. (1998) Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi kullanarak yaptıkları analizde; dikdörtgen kesitli kavite geometrisinin çıkış kenarı dairesel yuvarlatılarak ve farklı açılarda eğim verilerek akış karakteristiği üzerindeki etkisini Ma=1.5 durumu için incelemişlerdir. Çıkış kenar geometrisi üzerindeki dairesel ve eğimli geometrik modifikasyonun salınımı ve yüksek basınç kaynaklı sürüklenmeyi azalttığını belirlemişlerdir. Ayrıca, dikdörtgen kesite kıyasla ses basınç seviyesinin eğimli yüzeyde (SPL) 11.6 dB, dairesel kesitlide ise 6.3 dB düştüğünü hesaplamışlardır. Vikramaditya ve Kurian (2009), süpersonik hızlarda kavite çıkış duvar modifikasyonunun ses basınç seviyesine ve akış karakteristiğine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Eğim açısının 45° olduğu durumda kavite içerisindeki ses basınç seviyesini düşürdüğünü tespit etmişlerdir. Ancak, eğimin 15° ve 30° olduğu durumda ses basınç seviyesini arttırdığını belirlemişlerdir. Wang ve diğ. (2012), basitleştirilmiş bir kavite modeline sahip bir otomobil açılır tavanından gelen akustik şiddetini HAD kullanarak araştırmışlardır. Ayrıca, rüzgâr tüneline yaptıkları deney sonuçları ile HAD sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Açılır tavanda meydana gelen çarpma sesinin; akış ayrılmasının periyodikliği,

kavite ön kenarından oluşan girdap kopması ve kavitenin arka kenarındaki girdap çarpması nedeniyle oluştuğunu belirtmişlerdir. Deneysel ve sayısal sonuçlara göre; akış hızı yeterince yüksek olduğunda kavite ön duvarına yerleştirilen bir saptırıcının çarpma gürültüsünü azaltmadığını tespit etmişlerdir. Ancak, boşluk kademeli bir saptırıcı kullanıldığında nispeten yüksek akış hızlarında çarpma gürültüsünün etkili bir şekilde kontrol edilmesini sağlamışlardır. Zhang ve diğ. (1999), Ma sayısı 1.5 ve 2.5 durumları için kavite giriş kenarında dairesel rampa ve eğim geometrisinin ses basınç seviyesine etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Kavite giriş kenarı geometrisinin dairesel rampa olduğu durumda, Ma= 2.5'te kavite duvarındaki ses basınç seviyesini (SPL) azalttığını görmüşlerdir. Ancak, Ma=1.5'te SPL'deki değişimin ihmal edilebilir olduğunu belirlemişlerdir. Giriş kenarının dairesel eğimli olduğu durumda ise kavite duvarındaki ses basınç seviyesi her iki Mach sayısında da azalmıştır. Malhotra ve Vaidyanathan (2016), kavite çıkış kenarını, girişi kenarına oranla %10 kısaltarak basınç dalgalanması ve akustik seviyesine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Temel referans duruma kıyasla, kısa kenarlı geometrinin Rossiter modları arasında basınç salınımlarının tonal bileşenlerinde bir azalmaya yol açtığını belirlemişlerdir. Mancini ve diğ. (2019), dikdörtgen kesitli kavite akış içerisinde çıkış duvar modifikasyonlarının basınç salınımları üzerindeki etkilerini Ma=0.85 ve 1.35'te HAD yöntemi ile incelemişlerdir. Çıkış duvar rampa açısı eğiminin, kavite içindeki basınç salınımlarını bastırmada etkili olduğu ve özellikle 45° duvar açılarında 15 dB kadar düştüğü görülürken, 15° eğimde kayda değer bir etkinin görülmediğini belirtmişlerdir. Kim ve diğ. (2020) Ma=0.25'te yaptıkları analizlerde, kavite giriş ve çıkış kenarlarına eş zamanlı dairesel ve dik eğim vererek akış karakteristiği ve akustik etkileri açısından incelemişlerdir. Kavite giriş ve çıkış ağzındaki geometri, dairesel kesitli olduğu durumda türbülans şiddetinin azaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, gürültü seviyesinde yaklaşık %20 azalma olduğunu belirlemişlerdir.

Araştırmacılar tarafından kavite akış kontrolünde kullanılan yaygın pasif yöntemler arasında rüzgarlıklar, girdap oluşturmalar, ön ve arka duvar geometrisi değişiklikleri yer almaktadır. Akış fiziğini anlamak için halen çeşitli deneysel ve sayısal çalışmalar yürütülmektedir. Mevcut çalışmamızda, kavite çıkış kenarına 0.1-1.0 aralığında dairesel eğim verilerek oluşturulan beş farklı geometrik modifikasyonun ve kavite serbest akım giriş hızının gürültü ve akış karakteristiğine etkisi SST k- ω türbülans modeli kullanılarak incelenmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Sayısal Modelleme (Numerical Method)

Sayısal analizler, Şekil 1'de gösterilen Özsoy ve diğ. (2005) tarafından yapılan deneysel çalışmanın referans test bölümünü temsil eden iki boyutlu bir geometri üzerinde Reynolds ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denkleminin çözülmesine dayanmaktadır. Analizler, ticari bir yazılım olan ANSYS-Fluent programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kavite üzerindeki akışın kararlı, sıkıştırılmaz ve türbülanslı olduğu kabul edilmiştir. Akış çözümü için kullanılan kütle korunumu ve momentum denklemleri aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\text{Kütle korunumu;} \\ \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\text{Momentum denklemleri;} \\ \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i u_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left((v + v_t) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

Türbülanslı akış yapısını modellemek için farklı uygulamalarda da kullanılan en yaygın türbülans modellerinden biri olan Shear-Stress Transport (SST) k- ω kullanılmıştır. Menter (1994) çalışmasında SST k- ω türbülans modelinin, girdap-viskozite formülasyonuna taşıma etkilerinin dahil edilmesiyle akış ayrılmasını ve ters basınç gradyanlarını iyi bir şekilde modelleyeceğini belirtmiştir. SST k- ω türbülans modeli, sınır tabaka bölgesinde k- ω modelini, serbest kayma bölgesinde k- ϵ modelinin bir fonksiyonunu kullandığı hibrit bir modeldir. SST k- ω türbülans modeli için taşınım denklemleri;

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \tilde{P}_k - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \omega)}{\partial x_i} = \gamma \rho S^2 - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (4)$$

Burada; ρ akışkanın yoğunluğunu, x_i ve x_j konumu, u_i ; x_i konumundaki hız bileşenini, k türbülans kinetik enerji terimini, ω türbülans yayılım oranını, β ve σ ; denklem sabitini, F_1 karışım fonksiyonunu, μ_t türbülans viskozitesini, S gerinim hızının ölçüsünü ve P_k üretim terimini ifade etmektedir.

Akışta meydana gelen akustik değişimler ise Navier-Stokes denklemlerinin çözülmesiyle tamamen karakterize edilebilir. Ancak, akışkanın akustik enerjisi dinamik enerjisinden ve akustik basınç değişimleri dinamik basınç değişimlerinden çok daha küçüktür. Bu nedenle, temel akış dinamiği ve akustiğin zaman ölçekleri birbiriyle uyumlu değildir. Bu nedenle zaman bağımlı analizlerin yapıldığı endüstriyel uygulamalardaki akustik problemlerin çözümü oldukça zor olmaktadır (Mohamud ve Johnson, 2006). Literatürde yapılan çalışmalar neticesinde üretilen sesin belirgin bir tonu olmadığı kabul edildiğinde, kararlı durum RANS çözümünden elde edilen türbülans şiddetleri, geniş bant kaynak gürültüsünün (Broadband Noise Sources, BNS) ölçüsünü sağlamak için yarı deneysel korelasyonlarla birlikte kullanılabilir. BNS oldukça pratik akustik tasarım modeli olmasına rağmen, alıcı konumlarında herhangi bir ton gürültü bilgisi veya gürültü spektrumu sağlamaması en büyük dezavantajlarından biridir. Bunun yerine, kaynaktan yayılan gürültünün sadece yaklaşık bir ölçüsünü hesaplamaktadır (Horváth ve Vad, 2009). ANSYS-Fluent modelinde birden fazla BNS modeli bulunmaktadır. Çalışma kapsamında kullanılan Proudman'ın modeli, Lighthill'in Navier-Stokes denklemlerine dayanan akustik teorisinden türetilmiştir (Proudman, 1952). Proudman'ın modeli esas olarak türbülanslı gürültü olarak da bilinen akış ayrılmalarından ve türbülanslı sınır tabakası içindeki türbülans çalkantılarından kaynaklanmaktadır (Zhang ve diğ., 2014). Birim hacim başına akustik güç için Proudman tarafından aşağıdaki analitik ifade türetilmiştir:

$$P_A = c \rho_0 \left(\frac{u^3}{l} \right) \frac{u^5}{a_0^5} \quad (5)$$

Denklemden, c Proudman tarafından bulunan model sabitini, ρ_0 yoğunluğu, a_0 ses hızını, l türbülans uzunluk ölçeğini ve u türbülans hızını ifade etmektedir. Akustik güç L_p ise desibel (dB) cinsinden aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

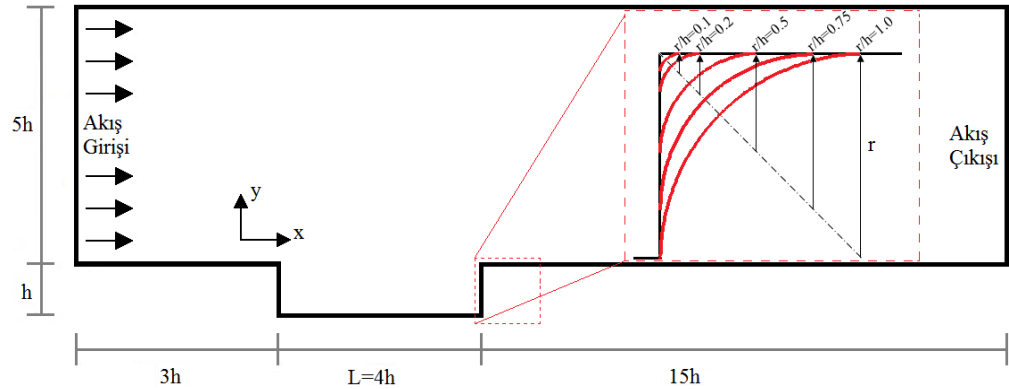
$$L_p = 10 \log \left(\frac{P_A}{P_{ref}} \right) \quad (6)$$

Analizlerde referans akustik güç, $P_{ref} = 10^{-12} W$ olarak alınmıştır (ANSYS, 2009).

Akış Hacmi ve Sınır Şartları (Flow Domain and Boundary Conditions)

Sayısal analizler için oluşturulan iki boyutlu akış hacmi Şekil 1'de gösterilmiştir. Özsoy ve diğ. (2005) tarafından yapılan deneysel çalışmanın geometrik ölçüleri dikkate alınarak, kavite derinliği $h=20$ mm, kavite uzunluğu ise $L=4h$ olarak belirlenmiştir. Kanal giriş ile kavite giriş kenarı arasındaki uzunluk $3h$, kavite çıkış kenarı ile kanal çıkışı arasındaki mesafe ise $15h$ uzunluğundadır. Kanal giriş yüksekliği ise girişten çıkışa kadar sabit ve $5h$ yüksekliğindedir.

Dikdörtgen kavite geometrisi referans model olarak alınmıştır. Dikdörtgen geometriye ek kavite derinliği sabit tutularak, Şekil 1'de detayı görülen kavite çıkış kenarı $r/h=0.1$ ile 1.0 arasında değişen bir r yarıçapı ile yuvarlatılmıştır.

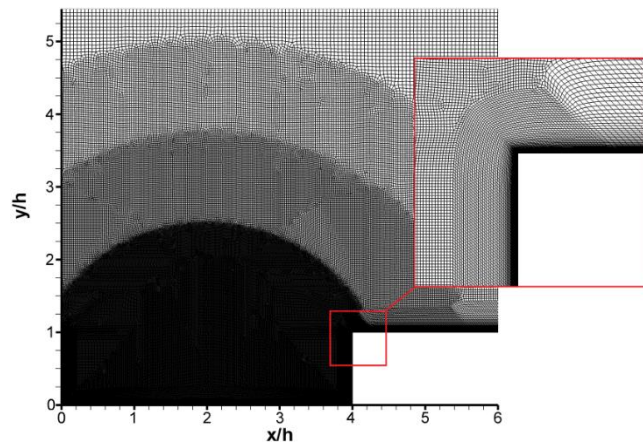


Şekil 1. Akış hacmi ve sınır şartları

Figure 1. Computational flow domain and boundary condition.

İki boyutlu çözüm alanında kavite taban yüzeyine ve üst duvarına kaymama sınır koşulu (no-slip) tanımlanırken, çıkış sınırında basınç çıkışı sınır şartı tanımlanmıştır. Akış alanının akış girişinde ise üniform hız girişi sınır şartı tanımlanmıştır. Yapılan analizlerde model doğrulaması için $Re_h = 4 \times 10^3$ değerinde analizler yapılmıştır. Daha sonra, her bir geometrik konfigürasyon için serbest akışın $U_\infty = 10-35$ m/s hızları için kavite derinliğine bağlı olarak Reynolds sayıları $Re_h = 1.33-4.66 \times 10^4$ aralığında değiştirilmiştir. Çözümde basınç-hız eşlemede COUPLED algoritması kullanılmıştır. Basınç ve momentum denklemlerinin ayrıklaştırılmasında ikinci mertebeden sonlu farklar şeması kullanılmıştır. Tüm akış alanı değişkenleri için 10^{-6} mertebesine kadar yakınsama sağlanmıştır.

Akış hacmi için ANSYS-Meshing modülünde blok tipi yapısal ağ Şekil 2'deki gibi oluşturulmuştur. Kavite bölgesine yaklaştıkça kademe kademe hücre boyutları küçültülmüştür ve yüksek hız gradyenlerinin beklendiği kavite bölgesi yakınında yoğunlaştırılmıştır. Ayrıca kanal zemin duvarı boyunca basınç değişimlerinin doğru çözümlenebilmesi için ağ yapısı, y^+ değerinin tüm duvarlarda 1'den küçük olmasını sağlayacak şekilde sıklaştırılmıştır. Akış hacmi boyunca kanal taban duvarında 0.005 mm başlangıç yüksekliğinde 1.05 artırma oranına sahip 80 katmanlı sınır tabaka ağ yapısı oluşturulmuştur. Ağ yapısından bağımsız çözümler elde edebilmek için farklı ölçeklendirmeler ile eleman boyutları ve buna bağlı olarak sayıları değiştirilerek denemeler yapılmıştır. Yapılan nihai ölçeklendirmeler ile oluşturulan ağ yapılarından bağımsız çözümlerin sağlandığı yaklaşık 251,473 elemandan oluşan ağ yapısı kullanılmıştır. Farklı geometrik modifikasyonlar için de aynı ölçekler kullanılmıştır. Yarıçapın artmasıyla birlikte akış alanının artmasından dolayı eleman sayısında da bir miktar artış olmuştur.



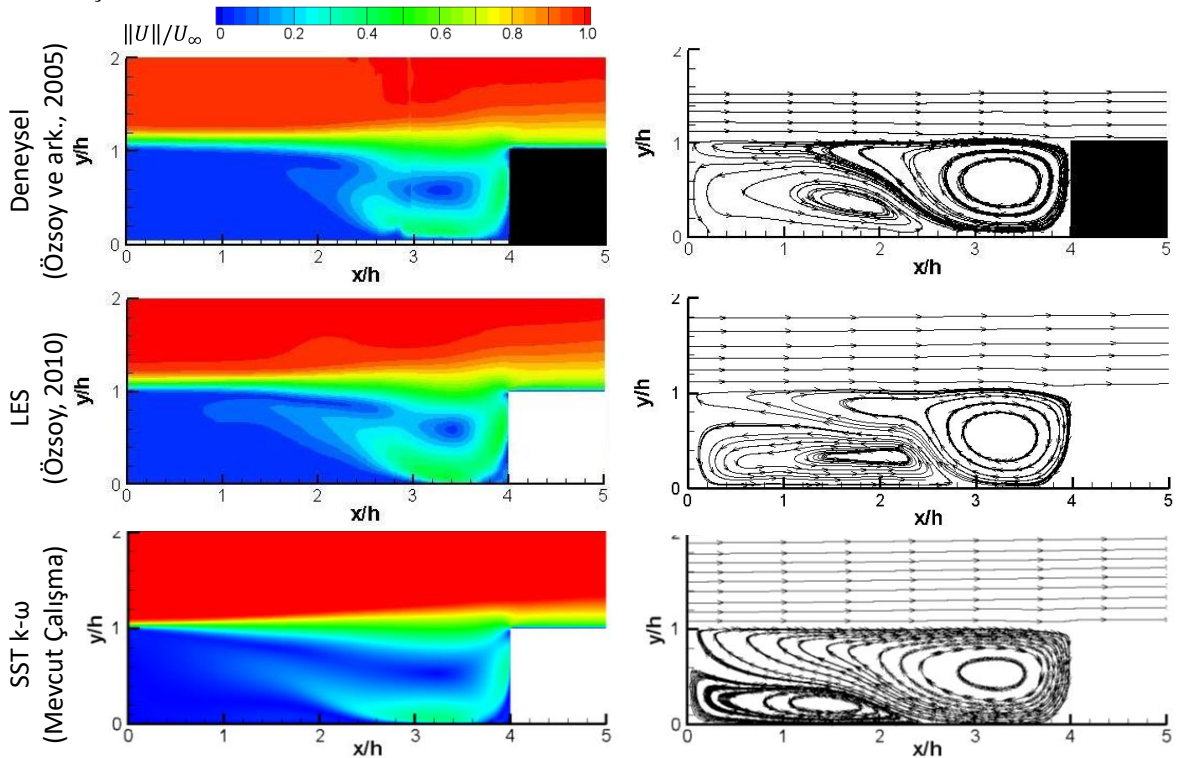
Şekil 2. Kavite bölgesi için ağ yapısı.

Figure 2. Computational grid system for the cavity model.

Sayısal Analizlerin Doğrulanması (Validation of Numerical Analysis)

Mevcut çalışma kapsamında kullanılan yöntemin doğrulanması için referans alınan dikdörtgen kesitli kavite akış alanına ait sonuçlar $Re_h=4 \times 10^3$ değeri için, Özsoy ve diğ. (2005) tarafından PIV yöntemi ile yapılan deneysel akış karakteristiğinin incelendiği sonuçlarla ve Özsoy (2010) tarafından LES türbülans modeli kullanılarak yapılan analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Şekil 3'te kavite bölgesindeki ortalama bileşke hız ve akım çizgileri karşılaştırılmıştır. Bileşke hız değerleri serbest akış hızı ile boyutsuzlaştırılmıştır. Kavite boyunca ilerledikçe kayma tabakasının kavite çıkış kenarına doğru genişlediği görülmektedir. Böylece, akış kavite çıkış kenarına çarparak kavite içerisinde saat yönünde dönen baskın bir girdap bölgesine sebep olmaktadır. Kavite giriş kenarında ise saat yönünde dönen baskın girdabın altında nispeten daha küçük saat yönünde bir girdap oluşmuştur. Birbirine göre ters dönen bu girdapların boyutları ve konumları, kavite geometrisine ve akış koşullarına bağlıdır. Mevcut çalışma kapsamında yapılan analiz sonucunda elde edilen, kavite içerisindeki girdapların konumu, büyüklükleri ve yayılımı referans alınan hem deneysel hem de LES analiz sonuçları ile nitelik olarak benzerlik göstermektedir. Saat yönünde dönen baskın olan girdabın merkezi, deneysel sonuçlarda yaklaşık $x/h=3.3$ ve $y/h=0.5$ 'te oluşurken, LES sonuçlarında $x/h=3.2$ ve $y/h=0.5$ 'te oluşmuştur. SST $k-\omega$ türbülans modelinin kullanıldığı mevcut analiz sonucunda ise $x/h=3.18$ ve $y/h=0.5$ 'te tespit edilmiştir. Yine aynı şekilde kavite giriş kenarında saat yönünün tersine dönen ikincil girdabın merkezi ise deneysel sonuçlarda yaklaşık $x/h=1.7$ ve $y/h=0.3$ 'te oluşurken, LES sonuçlarında $x/h=2.0$ ve $y/h=0.35$ 'te oluşmuştur. SST $k-\omega$ modeli ile elde edilen sonuçlarda ise $x/h=1.65$ ve $y/h=0.3$ 'te belirlenmiştir.



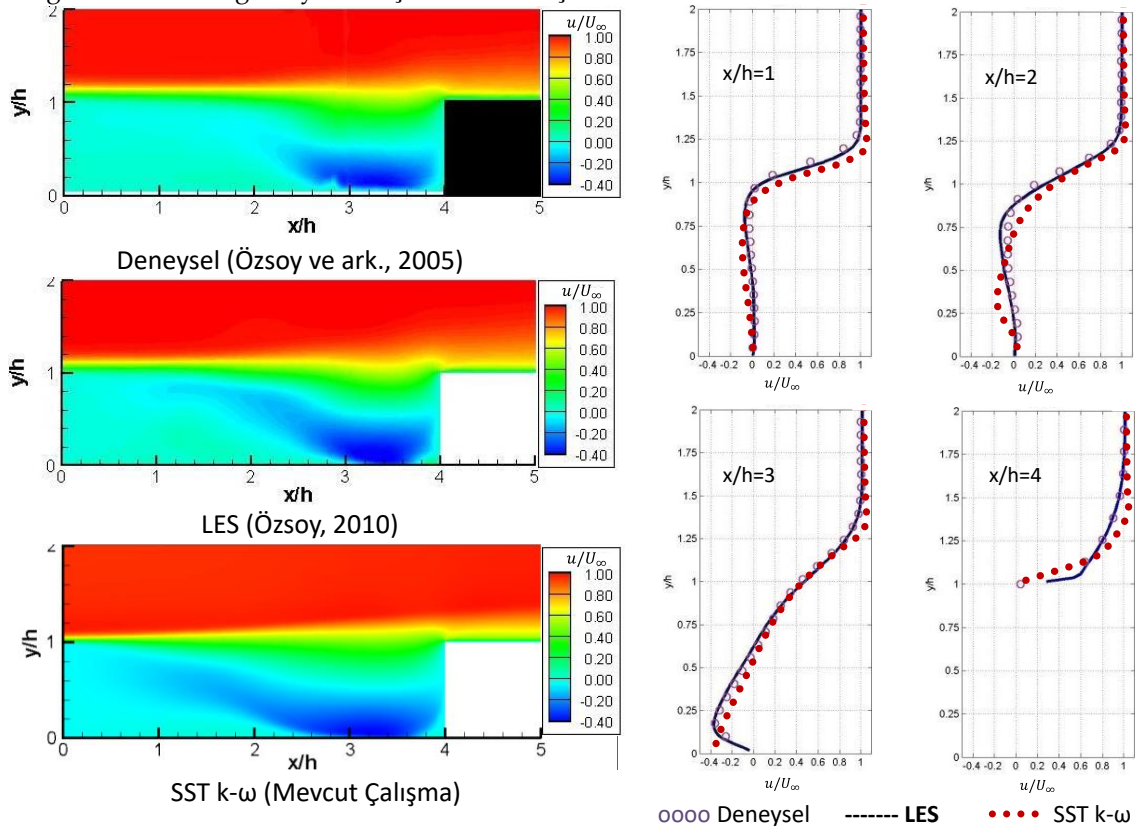
Şekil 3. $Re_h=4 \times 10^3$ için ortalama bileşke hız konturları ve akım çizgilerinin karşılaştırılması.

Figure 3. Comparison of mean velocity magnitude contours and streamlines at $Re_h=4 \times 10^3$.

Şekil 4' te ise akış yönündeki ortalama hız bileşeni ve 4 farklı istasyondaki çizgisel hız dağılımının karşılaştırılması verilmiştir. Hem literatürde yapılan çalışmalarda hem de mevcut analiz sonuçlarında kayma tabakası boyunca hız profilindeki değişim belirgin bir şekilde görülmektedir. Kayma tabakası boyunca kavite çıkış kenarına çarpan akış dönerek geriye doğru yönelmektedir ve daha sonra kavite giriş kenarına hareket ederek tekrar kayma tabakasına karışmaktadır. Çizgisel hız dağılımında da

görüldüğü üzere, her üç sonuçta da ters akışlar en yüksek değerine kavite tabanına yakın bölgede yaklaşık $x/h=3.4$ ve $y/h=0.15$ 'te ulaşmıştır.

Kavite bölgesindeki hız bileşenlerine ait sonuçlar karşılaştırıldığında kararlı durum için yapılan mevcut analiz sonuçlarının hem deney sonuçları ile hem de kararsız çözümün zaman ortalamalı sonuçları ile nicelik ve nitelik açısından iyi bir uyum içinde olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlardaki farklar ise üçüncü boyuttaki akış bileşeninden ve SST k- ω türbülans modelinin akış yapısını doğrudan çözmek yerine modellemesinden kaynaklanmaktadır. Ancak elde edilen sonuçlar hızlı mühendislik sonuçları için kabul edilebilir seviyededir. Bu nedenle referans alınan dikdörtgen kesitli kavite geometrisi için kullanılan yöntem hem farklı Re sayıları için hem de kavite çıkış kenarında yapılan geometrik konfigürasyonlar için kullanılmıştır.



Şekil 4. $Re_h=4 \times 10^3$ için akış yönündeki hız bileşeni konturları ve çizgisel hız profilinin karşılaştırılması.
Figure 4. Comparison of mean streamwise velocity contours and velocity profile at $Re_h=4 \times 10^3$.

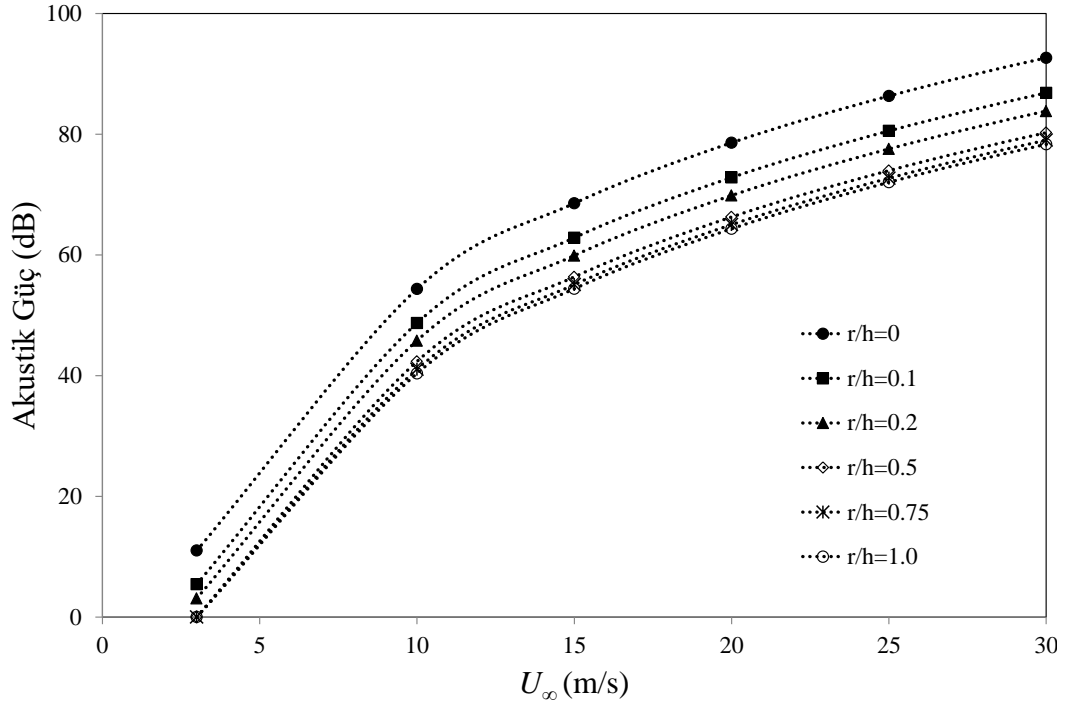
BULGULAR (FINDINGS)

Sayısal çalışmalar, dik kenarlı ve çıkış kenarının beş farklı çap oranı için tasarlandığı kavite akışı için özellikle gerçek sınır şartlarına karşılık gelen 10-35 m/s hızlar arasında yapılmıştır. Hava akışının altı farklı tasarım için sergilediği akış yapılarına ait görsel ve sayısal sonuçlar sunulmuştur. Ortalama bileşke hız konturları ($\|U\|/U_\infty$), akım çizgisi modelleri, türbülans kinetik enerji (TKE) ve gürültü seviyesi konturlarına (dB) ait görsel sonuçlar en düşük ve en yüksek Reynolds sayıları için Şekil 6, 7 ve 8'de verilmiştir. Ayrıca, farklı çap oranları ve Reynolds sayısına göre çıkış kenarındaki en yüksek gürültü seviyesinin tespit edildiği değerler Çizelge 1' de karşılaştırılmıştır ve aynı zamanda Şekil 5'te grafiksel olarak sunulmuştur.

Çizelge 1. Farklı hız değerleri ve çap oranları için en yüksek gürültü değerlerinin karşılaştırılması.

Table 1. Comparison of the highest noise values for different velocity values and r/h ratios.

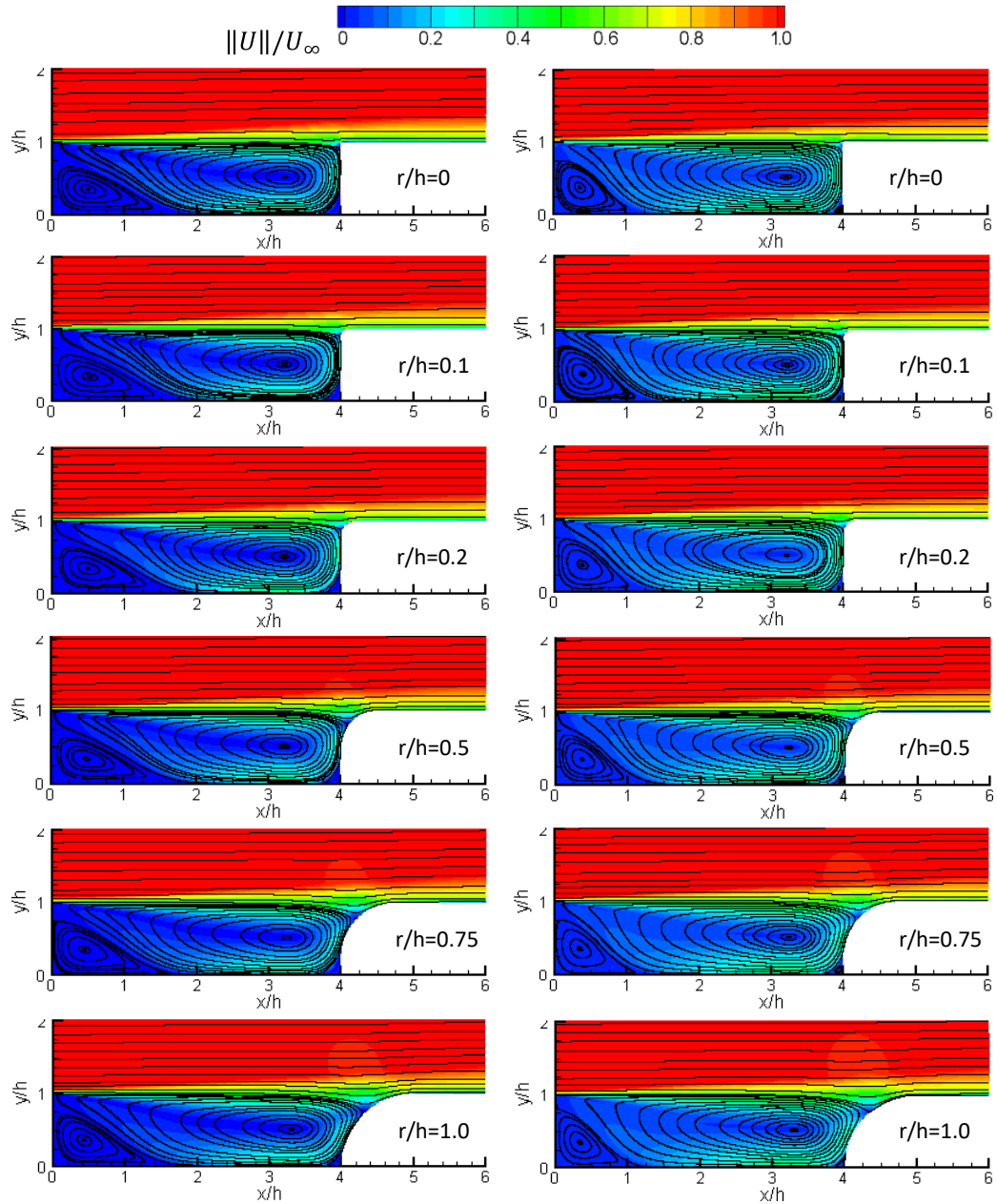
	r/h=0	r/h=0.1	r/h=0.2	r/h=0.5	r/h=0.75	r/h=1.0
3m/s	11.017	5.445	3.102	0.004	0	0
10m/s	54.358	48.711	45.804	42.354	41.047	40.367
15m/s	68.557	62.846	59.899	56.367	55.082	54.398
20m/s	78.589	72.828	69.853	66.289	65.016	64.334
25m/s	86.329	80.546	77.561	73.974	72.713	72.036
30m/s	92.654	86.844	83.835	80.254	79.013	78.330
35m/s	97.994	92.169	89.139	85.577	84.324	83.653



Şekil 5. Farklı akış hızı için kavite çıkış kanar geometrisin akustik güç seviyesine etkisinin karşılaştırılması.

Figure 5. Comparison of the effect of cavity trailing edge geometry on acoustic power level for different flow rates.

Çizelge 1’de hesaplanan değerler incelendiğinde; farklı çap oranları için tasarlanan çıkış kenar geometrisinin gürültü seviyelerinde tüm durumlar için azalma olduğu görülmüştür. Dik açılı kenar tasarımında 3 m/s ve 35 m/s hız değerleri için gürültü seviyeleri 11 dB’den 97 dB’e kadar çıkmaktadır. Ancak, artan çap oranı ile gürültü seviyelerinde düşük ve yüksek hızlarda sırasıyla %26 ve %15 seviyelerinde kayda değer azalmalar tespit edilmiştir. Hız değerleri arttığında gürültü seviyesindeki azalma yüzdesi düşük hızlara göre daha az olmuştur. En yüksek hız değeri 35 m/s için 97 dB gürültü seviyesi r/h=1.0 çap oranında 83 dB seviyelerine inmiştir. Literatürde yapılan benzer çalışmada; Kim ve diğ. (2020) yüksek hızlı trenin pantograf bölgesinde yaptıkları analizler de ise r/h=0 ile r/h=0.8 aralığında gürültü seviyesinin %20 azaldığını belirlemişlerdir.

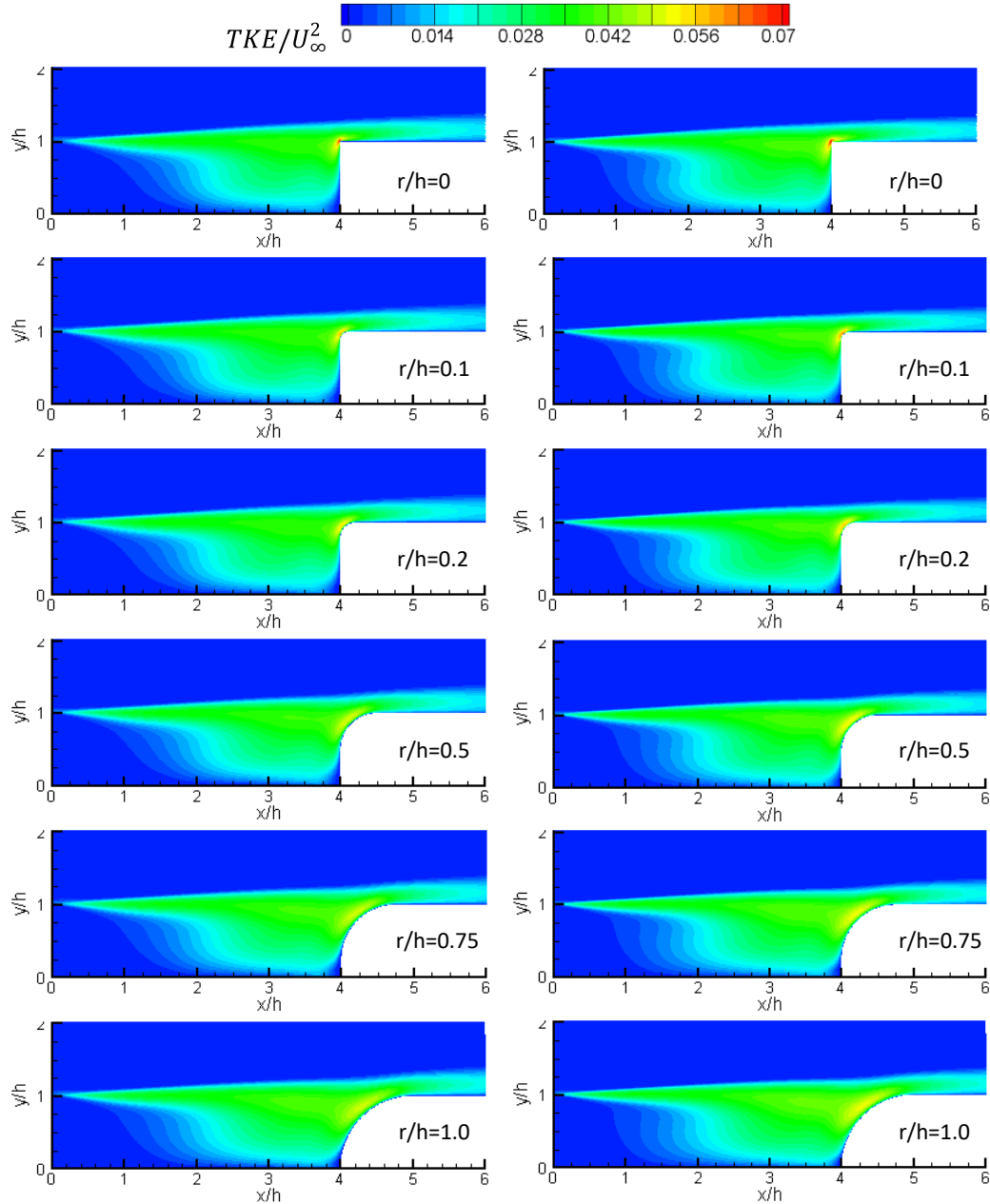


Şekil 6. Boyutsuz ortalama bileşke hız konturları ($\|U\|/U_\infty$) ve akım çizgilerinin farklı çap oranları için 10 m/s (sol sütun) ve 35 m/s (sağ sütun) hız değerlerinde karşılaştırılması.

Figure 6. Comparison of mean streamlines with non-dimensional velocity magnitude contours ($\|U\|/U_\infty$) at 10 m/s (left column) and 35 m/s (right column) for different r/h ratios.

Ortalama bileşke hız konturlarının ($\|U\|/U_\infty$) ve kontur üzerine eklenmiş akım çizgilerinin farklı çap oranları için 10 m/s ve 35 m/s hız değerlerindeki değişimleri Şekil 6'da görsel olarak sunulmuştur. Şekilde verilen bileşke hız değerleri giriş hızı (U_∞) ile x-y yönündeki mesafeler ise kavite yükseklik değeri h ile boyutsuzlaştırılmıştır. Görüntüler kavite akışın giriş kenarı, kavite boşluğu, çıkış kenarı ve devamındaki akış için verilmiştir. Kavite bölgesinde giriş kenarıyla birleşik bir adet küçük girdap oluşmuştur. Artan hız değeri ile küçük girdap boyutu kavite orta bölgesinden giriş kenarına doğru yönelmiştir. Kavitenin kalan kısmında ise bir ucu çıkış kenarında ve üst kısmı üniform hız bölgesi ile sınırlanmış büyük bir girdap daha meydana gelmiştir. Hız değerindeki artıştan dolayı küçük girdap bölgesinden boşalan alanı büyük girdap bölgesi doldurmuştur. Büyük girdap bölgesi çıkış kenarı için tasarlanan farklı çap oranlarındaki dairesel kesitle sürekli etkileşim halindedir ve artan çap oranı ile bir ucu akım yönünde uzamıştır.

Türbülans kinetik enerji konturlarının (TKE/U_∞^2) farklı çap oranları için 10 m/s ve 35 m/s hız değerlerindeki değişimleri Şekil 7'de verilmiştir. TKE değerleri, özellikle büyük girdap oluşum bölgesinde artmaya başlamıştır ve en yüksek değerlerini çıkış kenarı ile serbest akış bölgesinin birleştiği uç noktada almıştır. Hız arttıkça TKE konturlarının dağılımı da kavite içinde yayılmaya başlamıştır. Dik kesitli çıkış kenarlarında TKE konturları pik değerlere ulaşırken, çap oranının artmasıyla TKE değerleri akış yönünde azalmaya başlamıştır. Bu durum yeni tasarımın kavite akış için etkili olduğu bir pasif kontrol tekniği olarak değerlendirilmiştir. Azalan TKE değerlerine bağlı olarak gürültü seviyelerinde de azalmalar meydana gelmiştir.

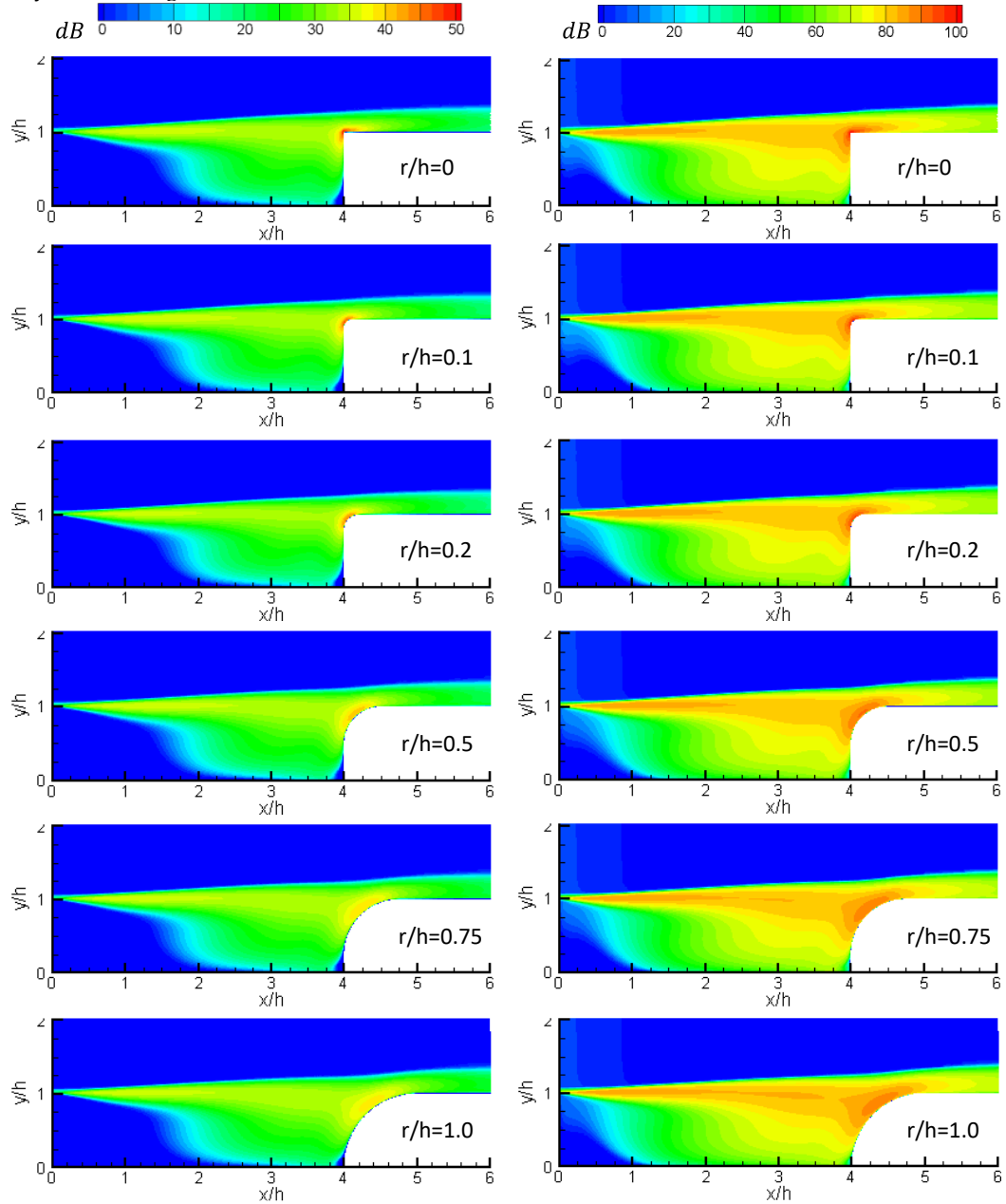


Şekil 7. Türbülans Kinetik Enerji konturlarının (TKE/U_∞^2) farklı çap oranları için 10 m/s (sol sütun) ve 35 m/s (sağ sütun) hız değerlerinde karşılaştırılması.

Figure 7. Comparison of Turbulent Kinetic Energy contours (TKE/U_∞^2) at 10 m/s (left column) and 35 m/s (right column) for different r/h ratios.

Şekil 8'de gürültü kontur değerlerinin (dB) farklı çap oranları için 10 m/s ve 35 m/s hız değerlerindeki değişimleri görsel olarak sunulmuştur. Hız değerlerindeki artışla birlikte gürültü seviyelerinde de ciddi artışlar meydana gelmiştir. Düşük hız değeri 10m/s için gürültü konturlarının pik

değerleri çıkış kenarının en üst kısmında oluşurken, 35 m/s hız değeri için giriş kenarının üst kısmından itibaren çıkış bölgesine doğru yayılan yüksek gürültü seviyeleri tespit edilmiştir. Özellikle gürültü konturlarının tek bir noktada pik değerlere ulaşmasının engellenmesi için tasarlanan dairesel kesitli çıkış kenarlarında artan çap oranı ile desibel değerlerindeki azalmalar tasarımların etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca, yüksek hız değerinde artan çap oranına bağlı olarak gürültü konturları kavite içine doğru bir yönelim sergilemiştir.



Şekil 8. Gürültü kontur değerlerinin (dB) farklı çap oranları için 10 m/s (sol sütun) ve 35 m/s (sağ sütun) hız değerlerinde karşılaştırılması.

Figure 8. Comparison of noise contour values (dB) at 10 m/s (left column) and 35 m/s (right column) for different r/h ratios.

SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Dikdörtgen kesitli kavite akışları için en yüksek gürültü seviyelerinin meydana geldiği çıkış bölgesine dairesel kesitli yeni kenar tasarımı yapılmıştır. Tasarımda beş farklı çap oranı için kavite etrafındaki akış karakteristikleri ve gürültü seviyeleri sayısal olarak araştırılmıştır. Özellikle dairesel

çıkış kenarında oluşan gürültü seviyelerinin azaltılmasına yönelik sonuçlar detaylı olarak sunulmuştur. Çalışmadan elde edilen belirgin sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Artan çap oranı ile tüm hızlar için gürültü seviyelerinde azalma olduğu tespit edilmiştir ve 10-35 m/s hız aralığında %26 ile %15 arasında düşüş hesaplanmıştır.
- Türbülans Kinetik Enerji değerleri, çap oranındaki artışa bağlı olarak dairesel kesit ile akış boyunca yayılmıştır ve değerleri azalmıştır. Kavite çıkış kenarının dik olduğu duruma göre, çıkış kenarı $r/h=1.0$ 'da Türbülans Kinetik Enerji değeri yaklaşık %30 azalmıştır.
- Çıkış kenarı için tasarlanan dairesel kesitler, akışın kaviteden çıktığı bölgede meydana gelen büyük ölçekli girdapların yapısını bozmuştur.
- Elde edilen sonuçlara göre dairesel kesitli çıkış kenar tasarımı, 10-35 m/s hız aralığında kavite uygulamaları için kullanılabilir niteliktedir.

Kavite çıkış kenarının hız çalkantıları ve gürültü seviyesi üzerinde önemli ölçüde etkili olduğu görülmektedir. SST $k-\omega$ türbülans modeli kullanılarak 2-D analizler ile yapılan analiz sonuçlarının hem deneysel hem de 3-D analiz sonuçları ile uyuşması gelecekte araştırmacıların zamandan tasarruf sağlayarak optimizasyon çalışmalarında hızlı sonuç elde etmelerine olanak sağlayacaktır. Bu kapsamda gelecekteki çalışmalarda çıkış kenarına bağlı olarak akış ayrılmalarının itki kuvvetine, gürültü ve titreşimlere etkisinin incelenmesi hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- ANSYS, 2009, ANSYS-FLUENT 12.0, Theory Guide, Section 22.3.
- Chen, H., Zhong, Q., Wang, X., Li, D., 2014, "Reynolds number dependence of flow past a shallow open cavity", *Science China Technological Sciences*, 57(11), 2161-2171.
- Horváth, C., Vad, J., 2009, "Broadband noise source model acoustical investigation on unskewed and skewed axial flow fan cascades".
- Kim, H., Hu, Z., Thompson, D., 2020, "Effect of cavity flow control on high-speed train pantograph and roof aerodynamic noise", *Railway Engineering Science*, 28(1), 54-74.
- Krishnamurty, K., 1955, "Acoustic radiation from two-dimensional rectangular cutouts in aerodynamic surfaces" (No. NACA-TN-3487).
- Malhotra, A., Vaidyanathan, A., 2016, "Aft wall offset effects on open cavities in confined supersonic flow", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 74, 411-428.
- Mancini, S., Kolb, A., Gonzalez-Martino, I., Casalino, D., 2019, "Effects of wall modifications on pressure oscillations in high-subsonic and supersonic flows over rectangular cavities", *In 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, (p. 2692).
- Menter, F.R., 1994, "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications", *AIAA journal*, Cilt 32, Sayı 8, ss. 1598-605.
- Mohamud, O. M., Johnson, P., 2006, "Broadband noise source models as aeroacoustic tools in designing low NVH HVAC ducts", *SAE Technical Paper*, No. 2006-01-1192.
- Noger, C., Patrat, J. C., Peube, J., Peube, J. L., 2000, "Aeroacoustical study of the TGV pantograph recess" *Journal of Sound and Vibration*, 231(3), 563-575.
- Özsoy, E., Rambaud, P., Stitou, A., Riethmuller, M. L., 2005, "Vortex characteristics in laminar cavity flow at very low Mach number", *Experiments in fluids*, 38(2), 133-145.
- Özsoy, E., Aslan, A. R., 2011 "Üç boyutlu bir kavite üzerindeki sıkıştırılmaz akışın sayısal bir yöntemle analizi". *İTÜDERGİSİ/d*, 10(3).
- Özsoy, E., 2010, "Numerical simulation of incompressible flow over a three dimensional rectangular cavity", *Doctoral dissertation*.
- Proudman, I., 1952, "The generation of noise by isotropic turbulence", *Proceedings of the Royal Society of London, Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 214(1116), 119-132.
- Rockwell, D., Naudascher, E., 1978, "Self-sustaining oscillations of flow past cavities", 152-165.

- Sciacchitano, A., Arpino, F., Cortellessa, G., 2021, "Benchmark PIV database for the validation of CFD simulations in a transitional cavity flow", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 90, 108831.
- Vikramaditya, N. S., Kurian, J., 2009, "Pressure oscillations from cavities with ramp", *AIAA journal*, 47(12), 2974-2984.
- Wang, Y., Lee, H. C., Li, K. M., Gu, Z., Chen, J., 2012, "Experimental and numerical study of flow over a cavity for reduction of buffeting noise", *Acta Acustica united with Acustica*, 98(4), 600-610.
- Zhang, X., Rona, A., Edwards, J. A., 1998, "The effect of trailing edge geometry on cavity flow oscillation driven by a supersonic shear layer", *The Aeronautical Journal*, 102(1013), 129-136.
- Zhang, X., Chen, X. X., Rona, A., Edwards, J. A., 1999, "Attenuation of cavity flow oscillation through leading edge flow control", *Journal of Sound and Vibration*, 221(1), 23-47.
- Zhang, L., Wang, R., Wang, S., 2014, "Simulation of broadband noise sources of an axial fan under rotating stall conditions", *Advances in Mechanical Engineering*, 6, 507079.



SYNERGISTIC EFFECT OF ESSENTIAL OILS AND SILVER NANOPARTICLES SYNTHESIZED USING GELATIN FOR ANTIBACTERIAL, SOIL RESPIRATION AND SOIL ENZYME ACTIVITIES

¹Büşra ESİRGENLER , ²Fatih ERCİ 

Necmettin Erbakan University, Faculty of Science, Department of Biotechnology, Konya, TURKIYE

¹busraesirgenler@gmail.com, ²ferci@erbakan.edu.tr

Geliş/Received: 20.04.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 29.07.2022

ABSTRACT: This study aims to investigate the synthesis of gelatin (Gel) and gelatin-glucose (Gel-Glu) mediated silver nanoparticles (AgNPs) and to investigate their synergies with different essential oils (EO) for antibacterial activity as well as their effects on soil respiration and soil enzyme activities. The antibacterial activities were evaluated using the agar diffusion test. The results of STEM analysis revealed that Gel-Glu-AgNPs in the range of 5–25 nm had a smaller size than Gel-AgNPs. Furthermore, we found that both AgNPs were positively charged by zeta analysis. In addition, at least one of the combinations of Gel-AgNPs and Gel-Glu-AgNPs with EO increased the antibacterial activity. The results also showed that AgNPs reduced soil respiration at the end of 120 h and that combinations of AgNPs and essential oils caused a significant reduction in alkaline phosphatase activities of soil samples compared to dehydrogenase activity, particularly at higher exposure times and concentrations. In conclusion, gelatin played an important role as a reducing and stabilizing agent in the synthesis of AgNPs. Finally, it was evaluated that combining nanoparticles and essential oil led to different results in the interaction of AgNPs with bacteria, which was additionally confirmed by soil respiration and enzyme analysis. The results justify further developing new strategies to uncover the effects of silver nanoparticles in different applications.

Keywords: Silver nanoparticles, Gelatin, Essential oils, Antibacterial activity, Soil enzymes

Jelatin Kullanılarak Sentezlenen Gümüş Nanopartiküller ile Esansiyel Yağların Antibakteriyel, Toprak Solunum Ve Toprak Enzim Aktivitelerinde Sinerjistik Etkisi

ÖZ: Bu çalışma, jelatin (Jel) ve jelatin-glukoz (Gel-Glu) aracılı gümüş nanopartiküllerin (AgNP'ler) sentezini araştırmayı ve bunların esansiyel yağlar (EO) ile sinerjilerinin toprak solunumu ve toprak enzim aktiviteleri üzerine etkilerini araştırmayı amaçlamaktadır. Antibakteriyel aktiviteler, agar difüzyon testi kullanılarak değerlendirildi. STEM analizinin sonuçları, 5-25 nm aralığındaki Gel-Glu-AgNP'lerin Gel-AgNP'lerden daha küçük bir boyuta sahip olduğunu ortaya koydu. Buna ilaveten, zeta analizi ile her iki AgNP'nin de pozitif yüke sahip olduğunu bulduk. Ayrıca, Gel-AgNP'ler ve Gel-Glu-AgNP'lerin EO ile kombinasyonlarından en az biri antibakteriyel aktiviteyi arttırdı. Sonuçlar, AgNP'lerin 120 saat sonunda toprak solunumunu azalttığını ve AgNP'ler ile uçucu yağların kombinasyonlarının, özellikle daha yüksek maruz kalma süreleri ve konsantrasyonlarında, dehidrogenaz aktivitesine kıyasla toprak numunelerinin alkalik fosfataz aktivitelerinde önemli bir azalmaya neden olduğunu gösterdi. Sonuç olarak jelatin, AgNP'lerin sentezinde indirgeyici ve stabilize edici bir ajan olarak önemli bir rol oynamıştır. Son olarak, nanopartiküller ve uçucu yağ kombinasyonunun, AgNP'lerin bakterilerle etkileşiminde farklı sonuçlara yol açtığı değerlendirilmiş, ayrıca bu toprak solunumu ve enzim analizi ile de doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, farklı uygulamalarda gümüş nanopartiküllerin etkilerini ortaya çıkarmak için yeni stratejilerin daha da geliştirilmesini doğrulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Gümüş nanopartiküller, Jelatin, Uçucu yağlar, Antibakteriyel aktivite, Toprak enzimleri

1. INTRODUCTION

Nanomaterials show distinctive physicochemical properties such as ultrasmall dimensions, high surface area-to-mass ratio and high chemical reactivity, so their applications in many fields are attracting attention (Song and Ge, 2019). Nanoparticles can be broadly classified as organic, inorganic, and carbon-based. Nanoparticles synthesized from nanometer-sized metals by either destructive or constructive methods are metal-based nanoparticles characterized by their small size and high surface area. Almost all metals can be synthesized into nanoparticles (Ealia and Saravanakumar, 2017; Jeevanandam et al., 2018). Thanks to their broad bactericidal activity and physicochemical properties against gram-negative and gram-positive bacteria, silver nanoparticles (AgNPs) are one of the most widely applied metallic nanoparticles for modern antimicrobial purposes (Burduşel et al., 2018; Gurunathan et al., 2014; Morones-Ramirez et al., 2013). Cationic silver, Ag^+ , is a popular bactericide and its utilization in various fields also generates increased negative effects on microscopic biota (Wijnhoven et al., 2009). Additionally, AgNPs can eliminate multiple drug-resistant strains and inhibit biofilm formation, showing significant potential for antibacterial applications (Yun'an Qing et al., 2018). On the other hand, studies on the toxicity of AgNPs in terms of antibacterial activity have yielded mixed results. While most studies have found that Ag^+ released from nanoparticles is the main chemical species causing toxicity, some studies have argued that nanoparticles exert a toxic effect by causing precise effects such as oxidative stress (Aruguete and Hochella, 2010; Fabrega et al., 2009).

Soil enzymes have biochemical and microbiological functions as soil health sensors (Caldwell, 2005). The biological effects of nanoparticles in the soil largely depend on the physicochemical properties of the soil (Cornelis et al., 2014). As a result of their existence and accumulation in soil, the effect of AgNPs on the soil ecosystem is becoming an increasingly popular research area. It is important to understand activity variation in soil enzymes, especially to unveil the effectiveness of nanoparticles on soil biology (Peyrot et al., 2014). Microbial diversity can be expressed by soil enzymes, which have functional importance in various biogeochemical processes and metabolic pathways (Nannipieri et al., 2002). Contamination soils with AgNPs can affect many microorganisms in the soil directly but also lead to indirect effects through their action on soil enzymes. The overall effects of AgNP contamination in soils may be seen in nutrient cycling and many microbially mediated biogeochemical processes (Peyrot et al., 2014).

Green synthesis has attracted considerable interest in materials science as a reliable, sustainable, and environmentally friendly protocol for the synthesis of a variety of nanomaterials, such as metal/metal oxide nanomaterials (Erci and Cakir-Koc, 2021; Erci et al., 2020, 2018; Erci and Torlak, 2019). Therefore, green synthesis is recognized as an important tool that is extensively used in laboratories and industry to lessen the harmful effects associated with traditional nanoparticle synthesis methods (Singh et al., 2018). It is important to synthesize the synthesized silver nanoparticles at cheaper rates for their effective use by humans. An environmentally and economically viable synthesis method is needed to obtain these nanoparticles (Prabhu and Poulouse, 2012). Since the amino acids, proteins, or secondary metabolites present in the biological synthesis of nanoparticles play an active role in preventing particle aggregation, the additional steps required for this process might be eliminated (Zhang et al., 2016). Gelatin, a natural biopolymer, is a preferred material for polymer implants due to its non-immunogenicity, biodegradability, and biocompatibility (Rath et al., 2016). Gelatin is typically made up of non-polar aliphatic amino acids such as glycine, proline, alanine, and hydroxyproline. The hydroxyl group of hydroxyproline facilitates AgNO_3 reduction, while non-polar amino acids promote the stability of AgNPs (Nagarajan et al., 2012; Yiwei et al., 2007). Herein we aimed to develop a framework to study the production of silver nanoparticles (AgNP) synthesized using gelatin and the synergistic activities of different essential oils against some bacterial strains. At the same time, as a further goal, the investigation of the effect of synthesized AgNPs on soil respiration with soil enzymes was carried out.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Gelatin-mediated synthesis of silver nanoparticles

Gelatin (bovine skin, type B powder, catalog no. G6650), glucose (catalog no. G7528), and silver nitrate (catalog no. 209139) used to synthesize AgNPs were obtained from Sigma-Aldrich. Clove (*Eugenia caryophyllata*) essential oil (CEO) and peppermint (*Mentha piperita*) essential oil (PEO) were purchased as a commercial product in a volume of 10 mL (100%) (Mecitefendi, Turkey). All glass containers used in the experiment were washed with distilled water before use. To prepare Gel-AgNPs, gelatin solution was used to reduce AgNO₃ to AgNPs. Briefly, an aqueous gelatin solution (1 g, 100 mL) was prepared by stirring on a magnetic stirrer for 30 min. To prepare Gel-Glu-AgNPs, 60 mg of glucose was added to the gelatin solution. Then a solution of 27 mg AgNO₃ (in 1 mL of ddH₂O) was added to the gelatin-glucose solution. Synthesis of Gel-AgNPs was completed using a household microwave for 25 min (Arçelik, MD 574, Turkey), while the synthesis of Gel-Glu-AgNPs was achieved at 80 °C for 90 min.

2.2. Characterization of AgNPs

UV-Visible (UV-Vis) spectra of the synthesized Gel-AgNPs were recorded with a Cary 60 UV-Vis spectrophotometer (Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA) in the wavelength range of 200–800 nm. The Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) examination was performed using a Shimadzu IR Prestige-21 FTIR-ATR spectrometer in the 400–4000 cm⁻¹. An X-ray diffraction (XRD) system (PANalytical Empyrean XRD) was used to determine the crystal structure of Gel-AgNPs in the range of 20–80 degrees and a step size of 0.02. The chemical composition of the synthesized Gel-AgNPs was analyzed using an EDS analyzer in conjunction with scanning electron microscopy (SEM, SU 1510, Hitachi High-Technologies, Japan). Simultaneously, morphology and size analyses of AgNPs were investigated in Scanning Transmission Electron Microscopy (STEM) mode on the ZEISS Gemini SEM 500 instrument (Carl Zeiss Co., LTD, Shanghai, China). Furthermore, Gel-AgNPs were diluted 1:2 with ultrapure water to define the average surface charge of Gel-AgNPs using a Malvern ZEN 3600 Nano ZS Zetasizer (Malvern Instruments, UK) and the measurement was performed at 633 nm wavelength and 173° retroreflection angle. The size distribution of the AgNPs synthesized on the same instrument was determined using dynamic light scattering (DLS).

2.3. Antibacterial activity of AgNPs

The microorganisms used in the study (*Staphylococcus aureus* ATCC 25923, *Bacillus cereus* ATCC 11778, *Salmonella typhimurium* ATCC 14028, *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 15442, *Escherichia coli* ATCC 25922) were obtained from the American Type Culture Collection (ATCC, Rockville, MD, USA). Antibacterial activity was evaluated using the agar diffusion test. Bacterial cultures were adjusted to 0.5 McFarland standard, corresponding to a bacterial suspension of approximately 1 × 10⁸ and 2 × 10⁸ colony forming units (CFU/mL). 50 µL of the nanoparticle samples (400 µg/mL) and essential oils were used in each of the 7 mm diameter wells made on Mueller Hinton agar (MHA, Lab M, UK) plates. The essential oils provided were taken as 62.5 µL and completed with 1 mL of deionized water to obtain the working concentration. For synergistic activity, an equal volume of the mixture of nanoparticles and essential oils was mixed in a magnetic stirrer for one hour, and 50 µL of this mixture was added to each well. The diameter of the zones of inhibition (mm) was then measured using calipers after incubating the plates at 37° C. for 24 h. The experiments were carried out in triplicate.

2.4. Preparation of test soil and determination of soil properties

The soil samples used in the study were taken from the surface (0–30 cm depth) from 20 different locations on the campus area of Selçuk University in Konya Province, Turkey. After the soils were

thoroughly mixed, the residues were removed. After sampling, the soil samples were kept at 4 °C for biological analysis. Air-dried soil samples were passed across a 2 mm diameter sieve so that they were used for some physical and chemical analyses. 1 kg of fresh soil samples were placed in pots.

Soil properties were analyzed according to established standards. The Bouyoucos hydrometer method was used to determine the soil fractions as sand (50–2000 µm), silt (20–50 µm), and clay (<2 µm) (Gee and Bauder, 1986). The amount of organic matter was measured by applying Dumas dry combustion method via a LECO CN-2000 instrument (Wright and Bailey, 2001). Scheibler Calcimeter was used to measure calcium carbonate (CaCO₃) in soil (Nelson and Sommers, 1982). The soil aggregate stability was determined with artificial rainfall-simulation equipment (Gugino et al., 2009). Field capacity (FC) was determined as the percentage of moisture retained in soil under 33 kPa pressure. In comparison, the permanent wilting point (PWP) was calculated as a percentage of moisture retained in the soil at 1500 kPa pressure using a pressure plate apparatus (Klute, 1986). Then the available water capacity (AWC) was obtained by subtracting the PWP from the FC. Finally, pH and EC of the soil sample were measured in a 1:2.5 mixture (w/v) soil/pure water using a glass electrode on a digital pH meter and a conductivity meter, respectively (McLean, 1983; Rhoades, 1982). Soil properties are summarized in Table 1.

Table 1. Physiochemical properties of the soil samples

Physiochemical Properties	Soil Mixture
pH (1:2,5 soil: Water)	7.65
OM (%)	0.72
CaCO ₃ (%)	16.20
EC (1:2,5 soil: Water) µ mhos cm ⁻¹	1756
AS (%)	17.70
FC (%)	24.60
PWP (%)	12.80
AWC (%)	11.80

Abbreviations: OM, organic matter; EC, electrical conductivity; AS, aggregate stability; FC, field capacity; PWP, permanent wilting point; AWC, available water capacity

2.5. Measurement of soil respiration

Gel-AgNPs, Gel-Glu-AgNPs, clove essential oil, and peppermint essential oils and their combinations at a concentration of 0.2, 0.4, and 0.6 mL 250 g⁻¹ dry soil were applied to soil samples in pots. The nanoparticle concentrations for volumes of 0.2, 0.4 and 0.6 mL were 200, 400 and 600 µg, respectively. An equal volume of the mixture of nanoparticles and essential oils was mixed in a magnetic stirrer for one hour and applied to soil samples as the same concentration to study the synergistic effect. Later, the water content of the soil was brought up to the determined field capacity and then mixed and incubated for the indicated periods. Soil samples in pots were taken for enzyme analysis after 24, 120 and 240 h. Only samples at the end of 120 h were evaluated for soil respiration. "The Cornell Soil Health Assessment Training Manual" was followed to assess the effect of the applications on soil respiration (Moebius-Clune et al., 2016). Briefly, the soil samples (20 g), air dried and sieved through a 2 mm sieve, were placed in a perforated metal container with filter paper at the bottom of a jar. The soil was incubated at 28°C for 96 h with 9 mL of 0.5 M potassium hydroxide (KOH) and 7.5 mL of deionized water. Only deionized water

was added to the control samples. Electrical conductivity (EC) measurements were then taken using an EC probe to determine the EC of the KOH trap for each sample, followed by a calculation in $\text{mg CO}_2\text{-C g}^{-1}$ soil.

2.6. Effect of nanoparticles on the activities of soil enzymes

To evaluate the effect of applications on soil dehydrogenase and alkaline phosphatase activities, soil samples were first weighed and treated with samples in different doses of Gel-AgNPs, Gel-Glu-AgNPs, clove essential oil, and peppermint essential oil and their combinations. At the same time, the control group without samples was also incubated.

Enzyme activities in soil samples were assessed using colorimetric methods at the end of the 24, 120, and 240 h. Dehydrogenase and alkaline phosphatase activities were analyzed based on studies in the literature (Tabatabai and Bremner, 1969; Thalmann, 1968). Briefly, 1.0 g and 6.0 g of soil were transferred to a glass tube for alkaline phosphatase and dehydrogenase activity, respectively, and then suspended in buffered substrate solutions. To determine the alkaline phosphatase activity of the soils, 4 mL of MUB buffer (pH 11) and 1 mL of substrate solution (0.025 M p-nitrophenyl phosphate) were added to a 1 g soil sample and incubated at 37 °C for 1 h. After 15 min of centrifugation at 3500 rpm, 1 mL of 0.5 M CaCl_2 and 4 mL of THAMNaOH solution were added. Then the alkaline phosphatase activity was determined as an optical density in a spectrophotometer at 410 nm according to p-nitrophenol standard solutions. The results obtained were expressed as $\mu\text{g p-nitrophenol g}^{-1}$ dry soil. For dehydrogenase activity, 6 g fresh soil samples were mixed with 1 mL of substrate solution (3% TTC (2,3,5-triphenyl tetrazolium chloride) and 2.5 mL of glucose solution (1.2%) and then incubated at 25 °C for 24 h. At the end of the incubation, the samples were completed with 10 mL of methanol, followed by filtration through Whatman 42 filter paper. After washing 3-4 times, the tubes were filled with methanol to a final volume of 50 mL. The optical densities of the samples were measured in a microplate reader using a spectrophotometer at a wavelength of 485 nm corresponding to standard TPF (triphenylformazine solution). The data obtained were expressed as $\mu\text{gTPF g}^{-1}$ dry soil 24 h^{-1} . All these applications were performed in 3 repetitions.

3. RESULTS and DISCUSSIONS

3.1. Synthesis and characterization of AgNPs

In the current study, the synthesis of silver nanoparticles (AgNP) was successfully achieved by using gelatin as both a reducing and stabilizing agent. The reduction of AgNO_3 to AgNPs was confirmed by forming a reddish-brown color, a unique optical property for AgNPs. To monitor the synthesis of gelatin AgNPs, absorbance measurements were performed by UV-Vis spectroscopy at wavelengths between 200 and 800 nm. The synthesis of Gel-AgNPs carried out in the microwave was completed after 25 min, while the synthesis of Gel-Glu-AgNPs was completed at 80 °C for 90 min. As seen in Figure 1, the obtained characteristic peaks of Gel-AgNPs and Gel-Glu-AgNPs recorded at 446 and 435 nm, respectively, confirmed the presence of Gel-AgNPs and Gel-Glu-AgNPs. Furthermore, when comparing the results of this work with published data, good agreement was found (Behravan et al., 2019).

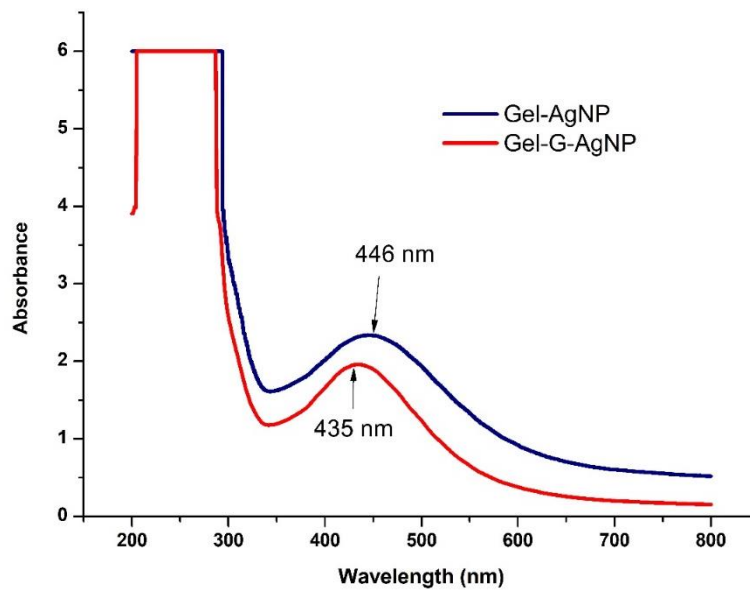


Figure 1. UV-Vis spectra of Gel-AgNPs and Gel-Glu-AgNPs.

Characterization by FTIR was performed to detect functional groups present in Gel-AgNPs and Gel-Glu-AgNPs (Figure 2). The bands of the FTIR spectra for Gel-AgNPs were recorded at 3338.78, 2987.74, 1643.35, 1504.48, 1226.73 and 1064.71 cm^{-1} . The FTIR analysis of Gel-Glu-AgNPs revealed the spectrum at 3358.07, 1643.35, 1516.05, 1192.04, and 1066.64 cm^{-1} . In the spectrum of Gel-AgNPs, broadband at 3338 cm^{-1} corresponding to hydrogen bonding and NH stretching was observed (Aewsiri et al., 2009). The strong absorption peak at 1643 cm^{-1} indicated the C=O stretching vibration (Mahmoud and Abbo, 2013). Since gelatin is a polyamide protein, the peaks at 1643 and 1504 cm^{-1} indicated the existence of amide I and II groups of the proteins. These arise owing to the electrostatic interaction between AgNP and gelatin. The related peaks confirmed that the silver nanoparticles were coated with gelatin (Burt et al., 2004).

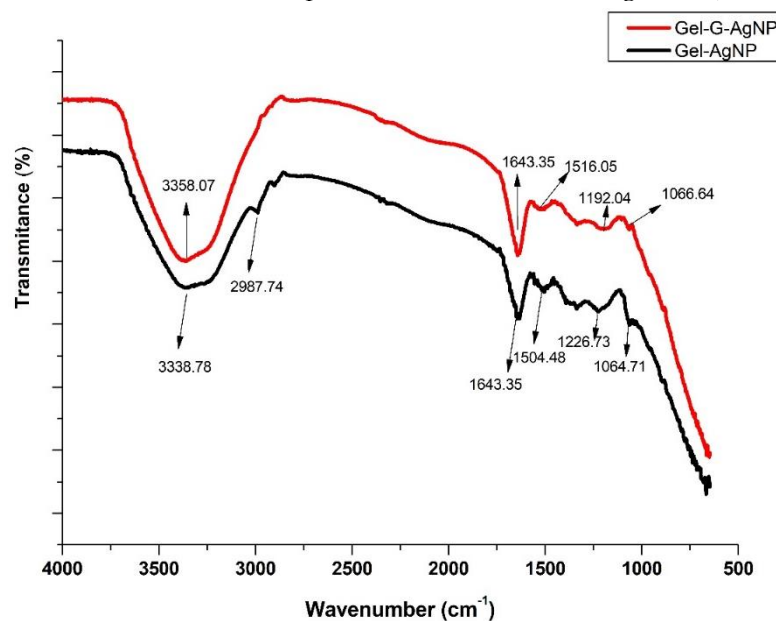


Figure 2. FTIR spectra of Gel-AgNPs and Gel-Glu-AgNPs.

In addition, the nanoparticles were characterized by XRD to reveal the crystal and nanostructure of AgNPs. The characteristic peaks observed in the XRD analysis further confirmed the formation of Gel-

AgNPs (Figure 3). Four different diffraction peaks of 38.51, 46.60, 64.78, and 77.72 corresponding to the crystallographic planes (111), (200), (220), and (311) indicated that silver nanoparticles were crystalline (Su et al., 2017). In addition, RD analysis showed a peak at 38.51 (2θ), indicating that the nanoparticles consisted of pure silver (Yılmaz Öztürk et al., 2020). Some unassigned peaks were also detected, indicating that the crystallization of the organic phase occurred on the surface of the silver nanoparticles.

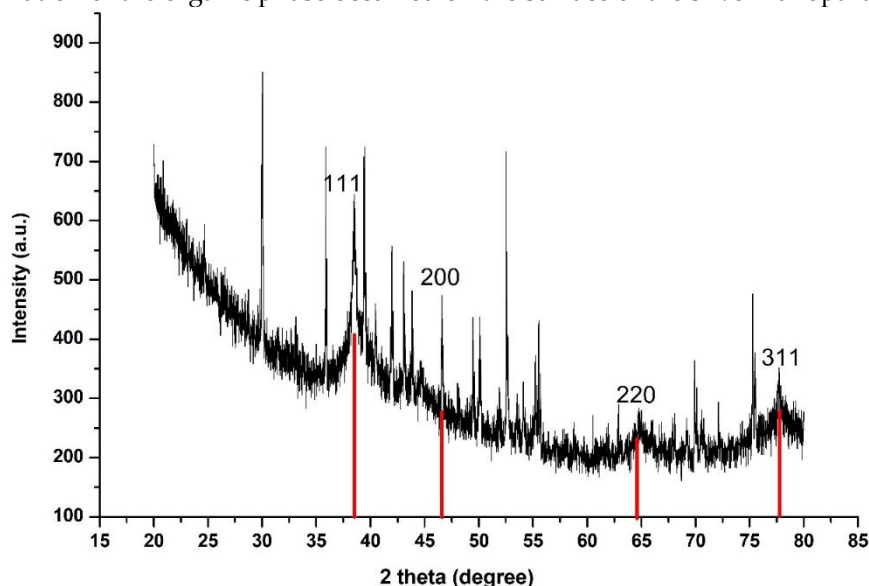


Figure 3. X-ray diffraction patterns of Gel-AgNPs.

As seen in Figure 4, EDS analysis of Gel-AgNPs revealed that the existence of high peaks indicates elemental silver with traces of other elements. The typical optical absorption peak at 3 keV is characteristic of metallic silver nanoparticles because of surface plasmon resonances (Gomaa, 2017). The appearance of C, N, and O-specific peaks is due to different components playing a role as stabilizing or capping agents in forming AgNPs (Galvez et al., 2021).

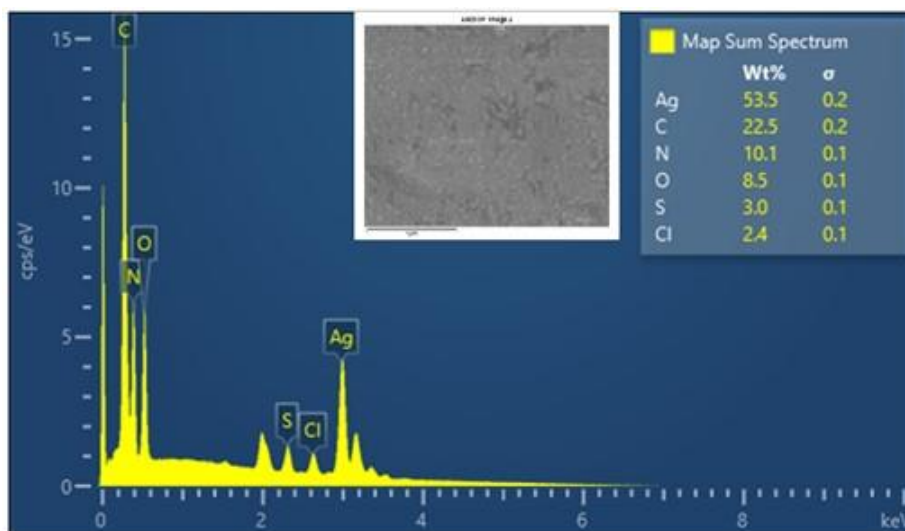


Figure 4. Energy dispersive spectroscopy (EDS) characterization of silver nanoparticles.

The STEM analyzes allowed us to obtain information about the shape and size structure of AgNPs (Figure 5). The size measurements determined that the sizes of Gel-AgNPs varied between 20 and 110 nm, while the sizes of Gel-Glu-AgNPs varied between 5-25 nm. The addition of glucose into the gelatin solution caused smaller silver nanoparticles. The results showed that the synthesized silver nanoparticles

had a spherical shape with a homogeneous distribution. The results of the zeta potential measurement showed that the synthesized Gel-AgNPs had a zeta potential of 5.21 (mV) (Figure 6a).

On the other hand, as shown in Figure 6c, Gel-Glu-AgNPs were found to have a zeta potential of 6.35 (mV). The zeta potential value of gel AgNPs could be caused by positively charged fragments on the gelatin surface. Also, the smaller zeta potential value of AgNPs showed chelating agents from cationic groups and non-ionic chelating gelatin groups (Pourjavadi and Soleyman, 2011).

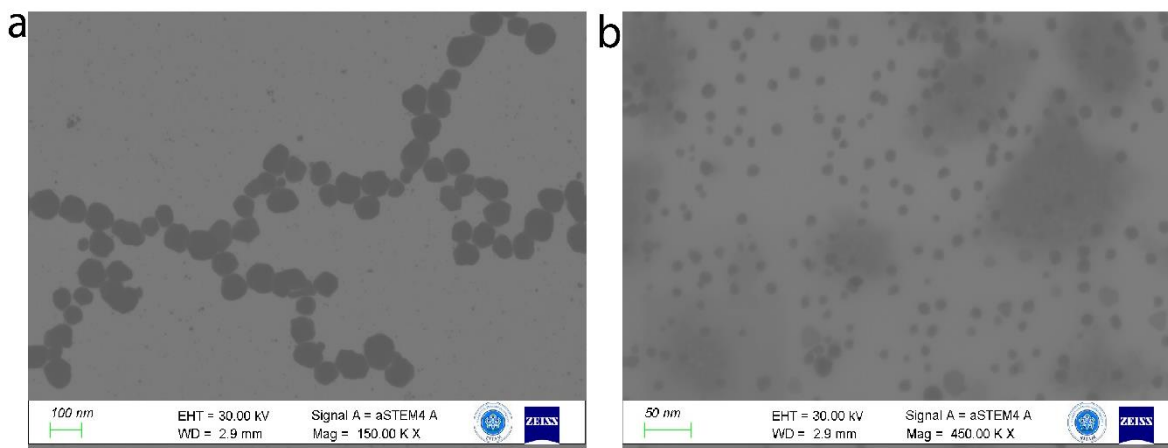


Figure 5. STEM micrographs of silver nanoparticles (a) Gel-AgNPs; (b) Gel-Glu-AgNPs.

The size and distribution of the Gel-AgNP and Gel-Glu-AgNPs were measured by dynamic light scattering (DLS), as shown in Figures 6b and 6d. DLS analysis revealed that the Gel-AgNPs were 158.4 nm in size and their polydispersity index (PDI) was 0.221. The polydispersity index is dimensionless and values above 0.7 indicate that the sample may have a broad size distribution (Nasiriboroumand et al., 2018). Gel-Glu-AgNPs were found to be 151.4 nm in size, and the polydispersity index (PDI) value was 0.224. The results of the DLS analyzes showed that Gel-AgNPs had a narrow size distribution compared to Gel-Glu-AgNPs.

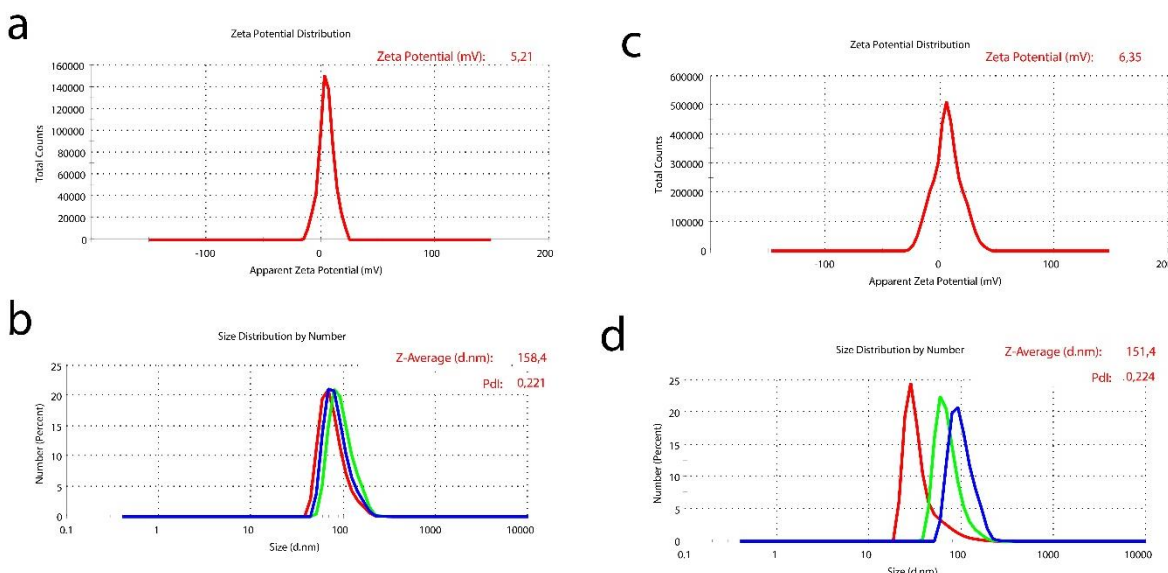


Figure 6. Zeta potential and DLS analysis of AgNPs (a) Zeta potential of Gel-AgNPs (b) Size distribution and PDI of Gel-AgNPs (c) Zeta potential of Gel-Glu-AgNPs (d) Size distribution and PDI of Gel-Glu-AgNPs.

3.2. Antibacterial activities of synthesized silver nanoparticles and synergistic effect with essential oils

The antibacterial activity of AgNPs against Gram-positive and Gram-negative bacteria was investigated using the agar diffusion method. A total of 50 μL of the samples was added to the 7 mm diameter well created on the agar plates. The diameter (mm) of the zone of inhibition formed around the wells was measured.

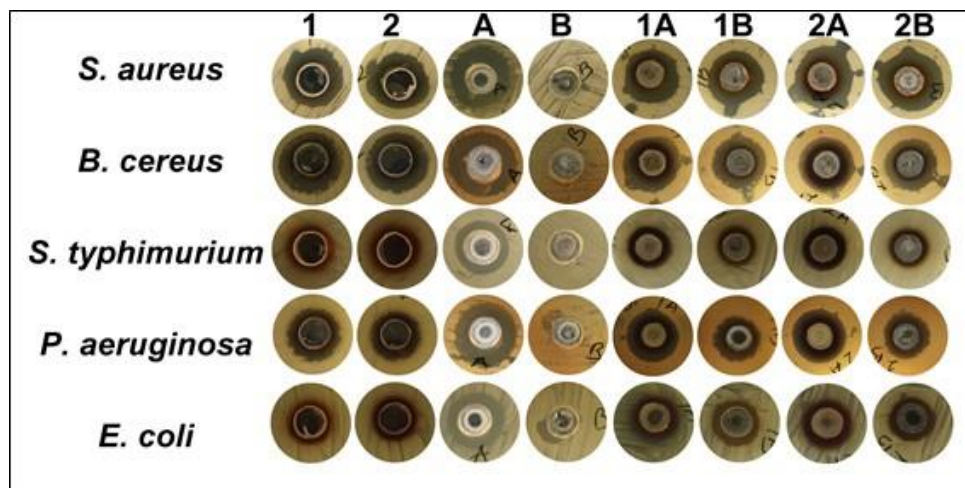


Figure 7. Inhibition zones of the silver nanoparticles. (1) Gel-AgNPs (2) Gel-Glu-AgNPs (A) CEO (B) PEO.

As seen from Figure 7 and Table 2, Gel-AgNPs showed a zone of inhibition of 17.88 ± 0.60 against *S. aureus*, while CEO showed a zone of inhibition of 18.49 ± 0.53 . No inhibition was observed in PEO at the relevant concentration. The gel AgNP and CEO combination was found to have a zone of inhibition of 18.18 ± 0.33 . Gel-Glu-AgNPs were found to show a synergistic effect with both clove and PEO with zones of inhibition of 19.37 ± 0.16 and 19.60 ± 0.53 , respectively. Gel AgNPs against *B. cereus* were found to have a zone of inhibition of 16.79 ± 0.27 at the indicated concentration, while CEO had a zone of inhibition of 18.67 ± 0.28 . It was shown that gel-AgNP-CEO and gel-AgNP-PEO formed a zone of inhibition of 20.04 ± 1.72 and 18.81 ± 0.46 and showed a synergistic effect against *B. cereus*. No inhibition against *B. cereus* was observed at the appropriate concentration of PEO.

On the other hand, Gel-Glu-AgNPs have been found to have a synergistic effect on both CEO and PEO. Gel-AgNPs were observed to show synergistic activity with CEO and PEO by showing 14.65 ± 0.17 and 12.87 ± 0.51 zones of inhibition against *S. typhimurium*, respectively. Furthermore, Gel-Glu-AgNPs have been shown to have synergistic activity with both essential oils. On the other hand, PEO showed no inhibition against *S. typhimurium* at the relevant concentration.

Table 2. Inhibition zones of the silver nanoparticles against tested microorganisms by agar well diffusion method. Each data point (diameter) in mm was expressed in terms of mean \pm standard deviation (mean \pm SD). (1) Gel-AgNPs (2) Gel-Glu-AgNPs (A) CEO (B) PEO

Samples	<i>S. aureus</i>	<i>B. cereus</i>	<i>S. typhimurium</i>	<i>P. aeruginosa</i>	<i>E. coli</i>
1	17.86 \pm 0.61	16.80 \pm 0.28	12.39 \pm 0.17	15.80 \pm 0.19	12.09 \pm 0.29
2	18.02 \pm 1.33	16.90 \pm 0.36	12.29 \pm 0.15	14.78 \pm 0.13	12.59 \pm 0.40
A	18.49 \pm 0.54	18.68 \pm 0.29	15.20 \pm 0.40	20.02 \pm 0.34	16.64 \pm 0.23
B	ND	ND	ND	ND	ND
1A	18.19 \pm 0.33	20.05 \pm 1.73	14.65 \pm 0.18	18.70 \pm 0.49	13.72 \pm 0.38
1B	17.94 \pm 0.15	18.81 \pm 0.46	12.87 \pm 0.52	16.11 \pm 0.75	14.28 \pm 0.21
2A	19.38 \pm 0.16	19.28 \pm 0.35	15.15 \pm 0.16	19.46 \pm 0.25	15.63 \pm 0.38
2B	19.60 \pm 0.54	18.10 \pm 0.38	13.02 \pm 0.16	16.36 \pm 1.11	13.28 \pm 0.20

ND denotes no antibacterial activity

According to the obtained results, it was found that Gel-AgNPs performed better inhibition than Gel-Glu-AgNPs with an inhibition zone of 15.80 ± 0.19 . It was found that CEO formed a zone of inhibition of 20.02 ± 0.49 , while PEO did not show any activity. While nanoparticles did not show a synergistic effect with CEO against *P. aeruginosa*, they demonstrated a synergistic effect with PEO. Also, it was found that Gel-Glu-AgNPs showed better inhibition than Gel-AgNPs with an inhibition zone of 12.59 ± 0.39 against *E. coli*. While both nanoparticles were observed to exhibit a synergistic effect with PEO, it was found that the 16.64 ± 0.23 zone of inhibition revealed by CEO alone was reduced with nanoparticles.

In the course of this work, we discovered that Gel-AgNPs and Gel-Glu-AgNPs showed the highest antibacterial activity against *S. aureus*. In addition, it was found that Gel-AgNP and Gel-Glu-AgNPs showed the lowest activity against *E. coli* and *S. typhimurium*, respectively. While CEO was observed to show high antibacterial activity at the indicated concentrations, PEO was found to show no activity at the same concentration. The synergistic antibacterial activity of Gel-AgNP and CEO was only observed against *B. cereus*. Additionally, Gel-Glu-AgNPs were found to have a synergistic effect with CEO against *S. aureus* and *B. cereus*. On the other hand, it was found that all nanoparticles showed synergistic activity with PEO in antimicrobial activity against all microorganisms.

There have been several previous attempts to synthesize silver nanoparticles using gelatin. In a study, facile synthesis of AgNPs using gelatin was performed. It was observed that the obtained Gel-AgNPs showed high stability (Lee and Zhang*, 2013). A report published by Lavanya et al., 2020, offered a comparative analysis of chemically synthesized AgNPs and gelatin synthesized AgNPs. Their study showed that gelatin AgNPs at a concentration of 80 $\mu\text{g/mL}$ inhibited the growth of *S. aureus*. It has been suggested that gelatin AgNPs lead to good bacterial inhibition even in low concentrations (Lavanya et al., 2020). Our findings suggest that Gel-AgNPs can serve as a potential antibacterial agent against Gram-positive and Gram-negative bacteria. Silver nanoparticles cause structural and morphological variations in bacterial cells, leading to cell death (Erci and Torlak, 2019). Recent research has shown that using essential oils and silver nanoparticles together produces a synergistic effect in antimicrobial activity. The antibacterial activity of a combination of biosynthesized silver nanoparticles produced by *Fusarium oxysporum* and essential oil of *Oreganum vulgare* against gram-positive and gram-negative bacteria, including multidrug-resistant strains, has been demonstrated experimentally.

Their results showed that the combination of the two compounds produced a synergistic effect that reduced MIC values and duration of action compared to AgNP used alone (Scandorieiro et al., 2016). Another study examined the effect of using eugenol alone or in combination with silver nanoparticles produced by *Fusarium oxysporum* on *Streptococcus agalactiae*. The overwhelming evidence showed that eugenol has bactericidal activity against planktonic cells of all strains. When this activity was combined with AgNPs, it resulted in a potent synergistic activity that significantly reduced the MIC values of both compounds (Perugini Biasi-Garbin et al., 2015).

3.3. Effect of AgNPs on soil respiration

Gel-AgNPs, Gel-Glu-AgNPs, CEO, PEO, and their combinations were applied to soil samples at 3 different volumes (0.2, 0.4 and 0.6 mL 250 g⁻¹ soil). On days 1, 5, and 10 (24, 120, and 240 h), the activity of soil dehydrogenase and alkaline phosphatase and at the end of day 10, soil respiration was analyzed compared to the untreated control group. The results of the treated samples measuring soil respiration are shown in CO₂ (mg g⁻¹) in Figure 8.

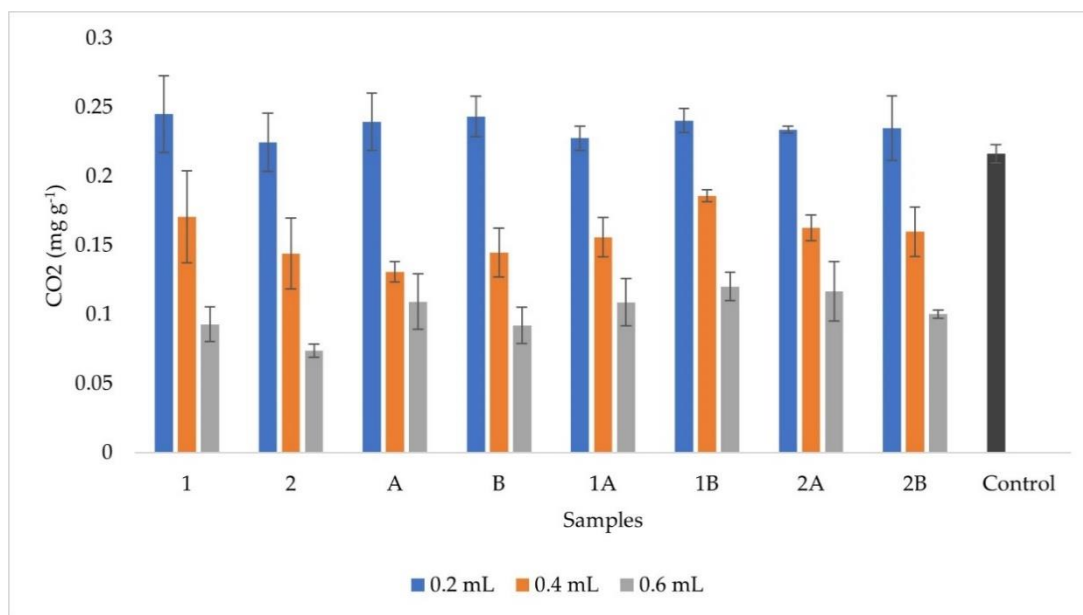


Figure 8. Respiration in soil affected by increasing sample doses. Values represent means standard deviations from three independent replicates. **1)** Gel-AgNPs **(2)** Gel-Glu-AgNPs **(A)** CEO **(B)** PEO.

The soil respiration value in the untreated soil sample was 0.22 ± 0.01 . It was found that soil respiration decreased most when applying the highest dose of Gel-Glu-AgNP (0.6 mL). An increase in soil respiration was observed at the lowest dose (0.2 mL) of all samples compared to the control. The initially increased effect of treatments on soil respiration is believed to be due to the death of hypersensitive species (Rahmatpour et al., 2017). While the third dose of the Gel-AgNP-PEO combination caused an increase in soil respiration compared to both AgNPs and PEO, there was no synergistic effect with CEO. A synergistic effect was observed at the third dose of the combination of Gel-Glu-AgNP with PEO and CEO. Results showed that the respiratory reduction was dose-dependent in all samples.

3.4. Effect of AgNPs and essential oils on enzymatic activities in soils

In this study, concentration and time-dependent dehydrogenase and alkaline phosphatase activities were examined to assess the effect of Gel-AgNPs, essential oils, and their combined effect on soil. By applying the samples as 0.2, 0.4, and 0.6 mL 250 g⁻¹ soil, the enzyme activities were measured during the exposure time of 24, 120, and 240 h and compared with the control group. Figure 9 shows the time-dependent variation of dehydrogenase activity with increasing application doses of AgNPs and essential oils (0.2, 0.4, and 0.6 mL 250 g⁻¹ dry soil). The values were given in $\mu\text{g p-nitrophenol g}^{-1}$ oven-dried soil⁻¹.

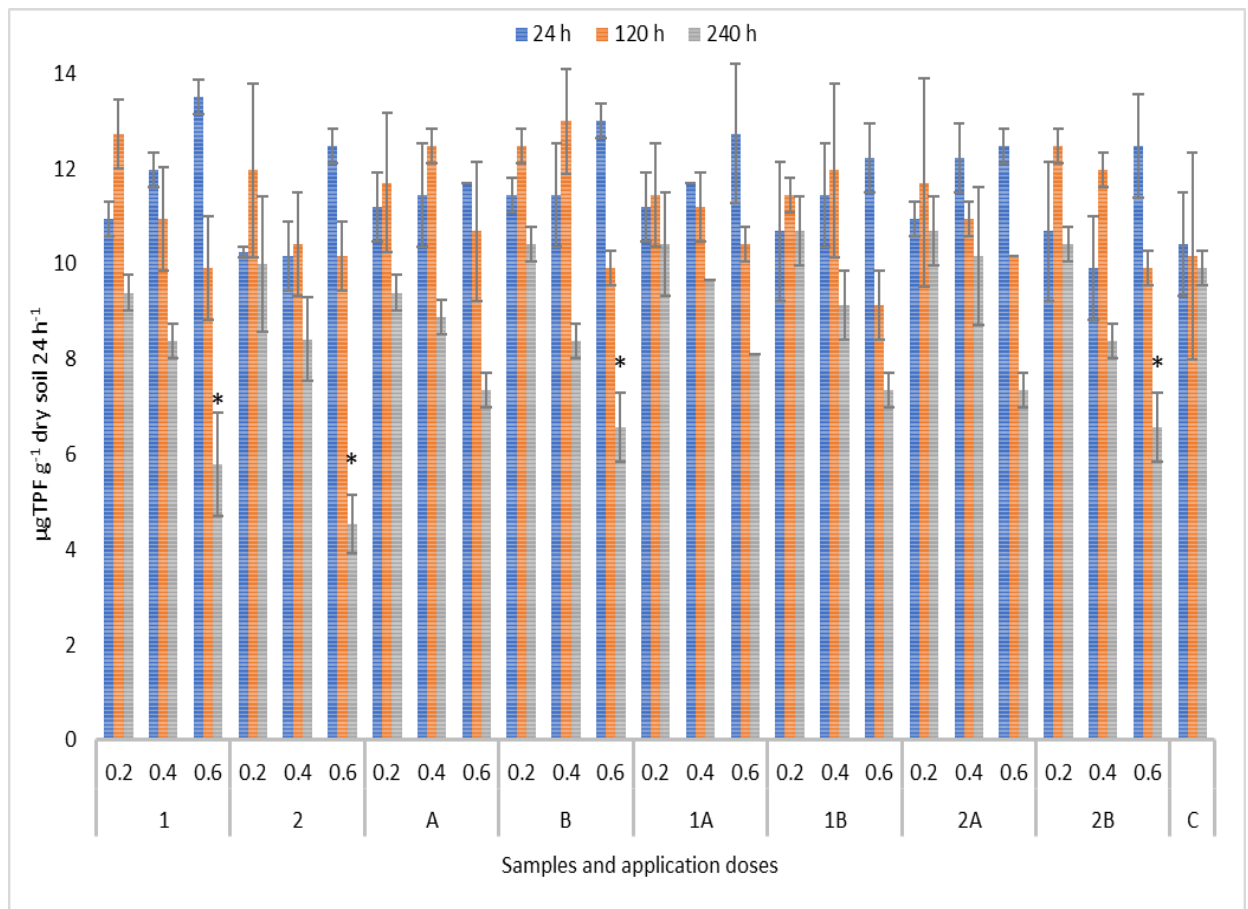


Figure 9. Dehydrogenase activity of soils treated by increasing the dose of the samples after incubation at different times. Values represent the means of three independent replicates \pm standard deviations. The asterisk (*) indicates a significant difference between the treatments and control (Tukey's test; $P < 0.05$). **1)** Gel-AgNPs (**2)** Gel-Glu-AgNPs (**A)** CEO (**B)** PEO.

At the end of 24 h, it was observed that the Gel-Glu-AgNP-PEO combination reduced the dehydrogenase activity the most. AgNPs and essential oils also increased dehydrogenase activity at high doses compared to the control. Gel-AgNPs increased dehydrogenase activity with a dose increase at the end of 24 h. For Gel-Glu-AgNPs, the enzyme activity was found to be close at the end of the 24 h in the first two doses, while there was an increase at the highest application dose. For the first dose of Gel-AgNPs (200 μg), there was an increase by the end of 120 h and a decrease in dehydrogenase activity by the end of 240 h. In addition, these nanoparticles have been shown to reduce dehydrogenase activity when the application doses were increased at the end of 120 and 240 h. It was observed that this situation remained the same in Gel-Glu-AgNPs. In particular, it was found that the dehydrogenase activity of nanoparticles at the end of the 240 h was significantly lower than that of the control when high doses were applied. Overall, the results show that high concentrations of AgNPs were more toxic to microorganisms in the rhizosphere (Das et al., 2012). The effects of the samples on the dose- and time-dependent soil alkaline phosphatase activity were shown in Figure 10.

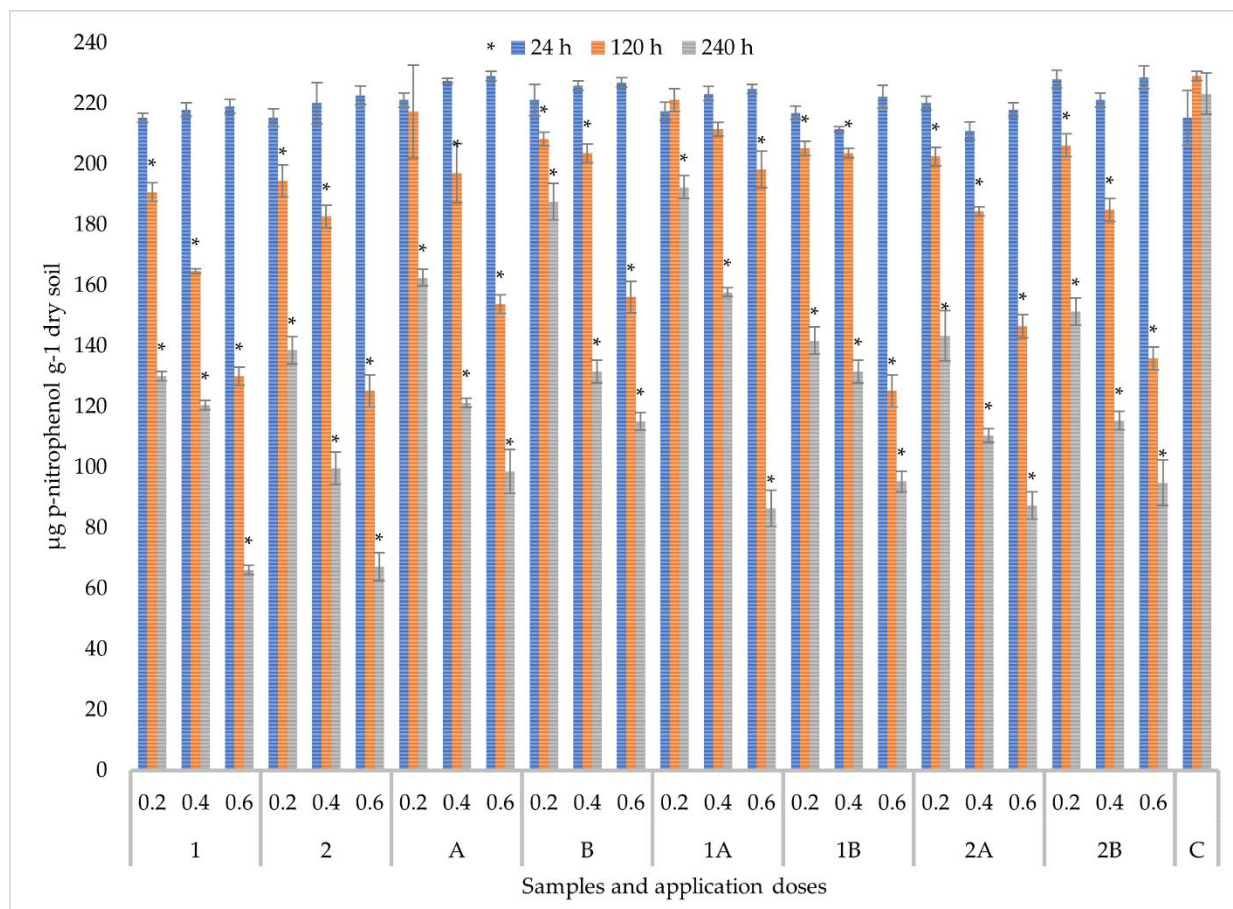


Figure 10. Alkaline phosphatase activity of soils treated by increasing the dose of the samples after incubation at different times. Values represent the means of three independent replicates \pm standard deviations. The asterisk (*) indicates a significant difference between the treatments and control (Tukey's test; $P < 0.05$). 1) Gel-AgNPs (2) Gel-Glu-AgNPs (A) CEO (B) PEO.

According to the results obtained, it was observed that the alkaline phosphatase activity increased at higher doses at the end of 24 h. On the other hand, it was observed that enzyme activity was inhibited in a time-dependent manner at all doses of nanoparticles and essential oils. In addition, it was found that the activity decreased as a function of the increase in dose due to the increase in time in all samples except 24 h. Analysis using one-way ANOVA and Tukey's test showed statistical significance ($p < 0.05$) between Gel-AgNPs (600 μg , 0.6 mL), Gel-Glu-AgNPs (600 μg , 0.6 mL), PEO (0.6 mL) and control for dehydrogenase activity at the end of 240 h incubation. On the other hand, the dose of 0.6 mL at the end of 240 h incubation was statistically different from the control in all samples ($p < 0.05$). Especially, it has been observed that alkaline phosphatase was most sensitive to AgNPs and essential oils. Exposure to high concentrations of AgNPs and a long period showed an inhibitory effect on the activities of both enzymes tested. This association has also been explored in prior studies (Mishra et al., 2021).

Several studies have explored the effects of nanoparticles on microorganisms and enzymes in pure soil. Shin et al. (2012) found that AgNPs showed obvious inhibition of dehydrogenase and urease activities at 100-1000 $\mu\text{g g}^{-1}$ dry soil concentrations. In another study, five soil exoenzymes (dehydrogenase, urease, acid phosphatase, neutral phosphatase, and alkaline phosphatase) were examined in the rhizosphere of wetland plants treated with silver nanoparticles (0, 0.024, 0.24, 4.80 and 9.60 $\mu\text{g g}^{-1}$ dry soil). AgNPs were found to inhibit all exoenzyme activities tested in their study, especially at high concentrations of AgNPs (4.80 and 9.60 $\mu\text{g g}^{-1}$ dry soil); significant inhibitory activity was observed (Cao et al., 2017).

4. CONCLUSIONS

In this study, silver nanoparticles were synthesized in an aqueous solution of gelatin, which acts as a reducing and stabilizing agent. In addition, a second nanoparticle synthesis was performed by adding glucose to the gelatin solution to reveal the role of gelatin. The nanoparticles obtained were characterized by different analytical techniques. The study found that the nanoparticles were positively charged through zeta potential analysis. In addition, the DLS analysis of nanoparticles allowed us to conclude that the PDI values were below 0.3 and the AgNPs synthesized therein were quite stable; hence this helps to obtain better results, especially regarding the stability of nanoparticles. In the study, the antibacterial activity of the synthesized AgNPs and their synergistic effect with essential oils against both gram-positive and gram-negative were carried out. The results showed that Gel-AgNPs and Gel-Glu-AgNPs exhibited antibacterial activity against both gram-positive and gram-negative bacteria. In contrast, both AgNPs showed the most potent antibacterial activity against *S. aureus*. Also, high antibacterial activity was observed for CEO, while no antibacterial activity existed for PEO. The results also showed that the synergistic activity in antibacterial activity depended on the type of essential oils, AgNPs, and bacterial strain, and this should be considered in future experiments. To expand the scope of the study, soil respiration and enzymes were also examined to understand the effectiveness of silver nanoparticles on soil microorganisms. In the course of this work, we found that the lowest application dose (0.2 mL) of the samples caused an increase in soil respiration compared to the control and that soil respiration decreased in all samples with increasing application dose.

The enzymes represent one of the most active organic compounds in the soil. Therefore, the dehydrogenase and alkaline phosphatase activities of the samples treated with AgNPs and essential oils and their combinations were examined at different times and application doses. In the enzyme analysis, an increase in enzyme activities was observed at the end of 24 h, while time-dependent enzyme inhibition was observed at other incubation times. In addition, it was observed that the enzyme activity decreased proportionally as the dose of the samples increased. It was also found that combinations of nanoparticles and essential oils could synergistically affect enzyme activities.

Since there are no regulations and standards for using AgNPs in agriculture, especially for soil treatment, the study can be particularly useful to evaluate such nanomaterials obtained and stabilized with gelatin in different applications. As a result, the obtained nanoparticles are believed to be free from toxic substances derived from other chemical or physical synthesis methods of nanomaterials. This could create a new perspective on the use and evaluation of nanoparticles in environmental applications.

FUNDING

This research was funded by Necmettin Erbakan University Scientific Research Projects (BAP) coordinator., grant number 201315003.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study arose from a part of B. Esirgenler's Master's thesis. The authors thank Vildan ERCI for soil analysis and Necmettin Erbakan University Science and Technology Research and Application Center (BITAM) for their research infrastructure.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest

REFERENCES

- Aewsiri, T., Benjakul, S., Visessanguan, W. 2009, "Functional Properties of Gelatin from Cuttlefish (*Sepia pharaonis*) Skin as Affected by Bleaching Using Hydrogen Peroxide", *Food Chemistry*, Vol. 115, No. 1, pp. 243–249.
- Aruguete, D. M., Hochella, M. F. 2010, "Bacteria–Nanoparticle Interactions and Their Environmental Implications", *Environmental Chemistry*, Vol. 7, No. 1, pp. 3–9.
- Behravan, M., Hossein Panahi, A., Naghizadeh, A., Ziaee, M., Mahdavi, R., Mirzapour, A. 2019, "Facile Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using *Berberis vulgaris* Leaf and Root Aqueous Extract and Its Antibacterial Activity", *International Journal of Biological Macromolecules*, Vol. 124, pp. 148–154
- Burduşel, A.-C., Gherasim, O., Grumezescu, A. M., Mogoantă, L., Ficai, A., Andronescu, E. 2018, "Biomedical Applications of Silver Nanoparticles: An up-to-Date Overview", *Nanomaterials*, Vol. 8, No. 9, p. 681.
- Burt, J. L., Gutiérrez-Wing, C., Miki-Yoshida, M., José-Yacamán, M. 2004, "Noble-Metal Nanoparticles Directly Conjugated to Globular Proteins", *Langmuir*, Vol. 20, No. 26, pp. 11778–11783.
- Caldwell, B. A. 2005, "Enzyme Activities as a Component of Soil Biodiversity: A Review", *Pedobiologia*, Vol. 49, No. 6, pp. 637–644.
- Cao, C., Huang, J., Cai, W.-S., Yan, C.-N., Liu, J.-L., Jiang, Y.-D. 2017, "Effects of Silver Nanoparticles on Soil Enzyme Activity of Different Wetland Plant Soil Systems", *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, Vol. 26, No. 5, pp. 558–567.
- Cornelis, G., Hund-Rinke, K., Kuhlbusch, T., van den Brink, N., Nickel, C. 2014, "Fate and Bioavailability of Engineered Nanoparticles in Soils: A Review", *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, Vol. 44, No. 24, pp. 2720–2764.
- Das, P., Williams, C. J., Fulthorpe, R. R., Hoque, M. E., Metcalfe, C. D., Xenopoulos, M. A. 2012, "Changes in Bacterial Community Structure after Exposure to Silver Nanoparticles in Natural Waters", *Environmental Science & Technology*, Vol. 46, No. 16, 2012, pp. 9120–9128.
- Ealia, S. A. M., Saravanakumar, M. P. 2017. "A review on the classification, characterization, synthesis of nanoparticles and their application". In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 263, p. 032019). IOP Publishing.
- Erci, F., Cakir-Koc, R. 2021, "Rapid Green Synthesis of Noncytotoxic Iron Oxide Nanoparticles Using Aqueous Leaf Extract of *Thymbra spicata* and Evaluation of Their Antibacterial, Antibiofilm, And Antioxidant Activity", *Inorganic and Nano-Metal Chemistry*, Vol. 51, No. 5, pp. 683–692.
- Erci, F., Cakir-Koc, R., Yontem, M., Torlak, E. 2020, "Synthesis of Biologically Active Copper Oxide Nanoparticles as Promising Novel Antibacterial-Antibiofilm Agents", *Preparative Biochemistry & Biotechnology*, Vol. 50, No. 6, pp. 538–548.
- Erci, F., Koc, R., Isildak, I., 2018, "Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using *Thymbra spicata* L. Var. *spicata* (Zahter) Aqueous Leaf Extract and Evaluation of Their Morphology-Dependent Antibacterial and Cytotoxic Activity", *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*, Vol. 46, No. sup1, 2018, pp. 150–158.
- Erci, F., Torlak, E., 2019, "Antimicrobial and Antibiofilm Activity of Green Synthesized Silver Nanoparticles by Using Aqueous Leaf Extract of *Thymus serpyllum*", *Sakarya University Journal of Science*, Vol. 23, No. 3, pp. 333–339.
- Fabrega, J., Fawcett, S. R., Renshaw, J. C., Lead, J. R., 2009, "Silver Nanoparticle Impact on Bacterial Growth: Effect of PH, Concentration, and Organic Matter", *Environmental Science & Technology*, Vol. 43, No. 19, pp. 7285–7290.
- Galvez, A. M., Ramos, K. M., Teja, A. J., Baculi, R., 2021, "Bacterial Exopolysaccharide-Mediated Synthesis of Silver Nanoparticles and Their Application on Bacterial Biofilms", *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, Vol. 2021, pp. 970–978.

- Gee, G. W., Bauder, J. W., 1986, "Particle-Size Analysis", *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, Vol. 5, Editor: Arnold, K., the American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Inc., 383–411.
- Gomaa, E. Z., 2017, "Antimicrobial, Antioxidant and Antitumor Activities of Silver Nanoparticles Synthesized by *Allium cepa* Extract: A Green Approach", *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, Vol. 15, No. 1, pp. 49–57.
- Gugino, B.K., Idowu, O.J., Schindelbeck, R.R., van Es, H.M., Wolfe, D.W., Moebius-Clune, B.N., Thies, J.E., Abawi, G.S., 2009, *Cornell Soil Health Assessment Training Manual*, Edition 2.0, Cornell University, Geneva, NY.
- Gurunathan, S., Han, J., Park, J. H., Kim, J.-H., 2014, "A Green Chemistry Approach for Synthesizing Biocompatible Gold Nanoparticles", *Nanoscale Research Letters*, Vol. 9, No. 1, pp. 248.
- Jeevanandam, J., Barhoum, A., Chan, Y. S., Dufresne, A., Danquah, M. K., 2018, "Review on Nanoparticles and Nanostructured Materials: History, Sources, Toxicity and Regulations", *Beilstein Journal of Nanotechnology*, Vol. 9, No. 1, pp. 1050–1074.
- Klute, A., 1986, "Water Retention: Laboratory Methods", In A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods (Second Ed.)*, Madison, Wisconsin USA: American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Inc. 635–662.
- Lavanya, K., Kalaimurugan, D., Shivakumar, M. S., Venkatesan, S., 2020, "Gelatin Stabilized Silver Nanoparticle Provides Higher Antimicrobial Efficiency as Against Chemically Synthesized Silver Nanoparticle", *Journal of Cluster Science*, Vol. 31, No. 1, pp. 265–275.
- Lee, C., Zhang*, P., 2013, "Facile Synthesis of Gelatin-Protected Silver Nanoparticles for SERS Applications", *Journal of Raman Spectroscopy*, Vol. 44, No.6, pp.823–826.
- Mahmoud, K. H., Abbo, M., 2013, "Synthesis, Characterization and Optical Properties of Gelatin Doped with Silver Nanoparticles", *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, Vol. 116, pp. 610–615.
- McLean, E. O., 1983, "Soil pH and Lime Requirement". *Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties*, 199–224.
- Mishra, P., Xue, Y., Eivazi, F., Afrasiabi, Z., 2021, "Size, Concentration, Coating, and Exposure Time Effects of Silver Nanoparticles on the Activities of Selected Soil Enzymes", *Geoderma*, Vol. 381, pp. 114682.
- Moebius-Clune, B.N., Moebius-Clune, D.J., Gugino, B.K., Idowu, O.J., Schindelbeck, R.R., Ristow, A.J., van Es, H.M., Thies, J.E., Shayler, H.A., McBride, M.B., Kurtz, K.S.M., Wolfe, D.W., Abawi, G.S., 2016, *Comprehensive Assessment of Soil Health – The Cornell Framework*, Edition 3.2, Cornell University, Geneva, NY.
- Morones-Ramirez, J. R., Winkler, J. A., Spina, C. S., Collins, J. J., 2013, "Silver Enhances Antibiotic Activity Against Gram-Negative Bacteria", *Science Translational Medicine*, Vol. 5, No.190, pp. 190ra81–190ra81.
- Nagarajan, M., Benjakul, S., Prodpran, T., Songtipya, P., Kishimura, H., 2012, "Characteristics and Functional Properties of Gelatin from Splendid Squid (*Loligo formosana*) Skin as Affected by Extraction Temperatures", *Food Hydrocolloids*, Vol. 29, No. 2, pp. 389–397.
- Nannipieri, P., Kandeler, E., Ruggiero, P., Burns, R. G., Dick, R. P., 2002, "Enzymes in the Environment: Activity, Ecology, and Applications", *Enzyme Activities and Microbiological and Biochemical Processes in Soil*. New York (NY): Marcel Dekker, 1–33.
- Nasiriboroumand, M., Montazer, M., Barani, H., 2018, "Preparation and Characterization of Biocompatible Silver Nanoparticles Using Pomegranate Peel Extract", *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, Vol. 179, pp. 98–104.
- Nelson, D. W., Sommers, L., 1982, "Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter 1". *Methods Of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties, (methodsofsoilan2)*, 539–579.
- Perugini Biasi-Garbin, R., Saori Otaguiri, E., Morey, A. T., Fernandes da Silva, M., Belotto Morguette, A. E., Armando Contreras Lancheros, C., Kian, D., Perugini, MR., Nakazato, G., Durán, N.,

- Nakamura, C. V., Yamauchi, L. M., Yamada-Ogatta, S. F., 2015. "Effect of Eugenol against *Streptococcus agalactiae* and Synergistic Interaction with Biologically Produced Silver Nanoparticles", *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, Vol. 2015, pp.861-497.
- Peyrot, C., Wilkinson, K. J., Desrosiers, M., Sauv e, S., 2014, "Effects of Silver Nanoparticles on Soil Enzyme Activities with and Without Added Organic Matter", *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol. 33, No. 1, pp. 115–125.
- Pourjavadi, A., Soleyman, R., 2011, "Silver Nanoparticles with Gelatin Nanoshells: Photochemical Facile Green Synthesis and Their Antimicrobial Activity", *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 13, No. 10, pp. 4647–4658.
- Prabhu, S., Poulouse, E. K., 2012, "Silver Nanoparticles: Mechanism of Antimicrobial Action, Synthesis, Medical Applications, and Toxicity Effects", *International Nano Letters*, Vol. 2, No. 1, pp. 32.
- Rahmatpour, S., Shirvani, M., Mosaddeghi, M. R., Nourbakhsh, F., Bazarganipour, M., 2017, "Dose-Response Effects of Silver Nanoparticles and Silver Nitrate on Microbial and Enzyme Activities in Calcareous Soils", *Geoderma*, Vol. 285, pp. 313–322.
- Rath, G., Hussain, T., Chauhan, G., Garg, T., Kumar Goyal, A., 2016, "Fabrication and Characterization of Cefazolin-Loaded Nanofibrous Mats for the Recovery of Post-Surgical Wound", *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*, Vol. 44, No. 8, pp. 1783–1792.
- Rhoades, J. D., 1982, "in Methods of Soil Analysis. Part2, Chemical and Microbiological Properties". Soluble salts, 167–179.
- Scandorieiro, S., de Camargo, L. C., Lancheros, C. A. C., Yamada-Ogatta, S. F., Nakamura, C. v, de Oliveira, A. G., Andrade C. G. T. J., Duran, N., Nakazato, G., Kobayashi, R. K. T., 2016, "Synergistic and Additive Effect of Oregano Essential Oil and Biological Silver Nanoparticles against Multidrug-Resistant Bacterial Strains ", *Frontiers in Microbiology*, Vol. 7, pp. 760.
- Singh, J., Dutta, T., Kim, K.-H., Rawat, M., Samddar, P., Kumar, P., 2018, "'Green' Synthesis of Metals and Their Oxide Nanoparticles: Applications for Environmental Remediation", *Journal of Nanobiotechnology*, Vol. 16, No. 1, pp. 84.
- Song, W., Ge, S., 2019, "Application of Antimicrobial Nanoparticles in Dentistry", *Molecules*, Vol. 24, No. 6, pp. 1033.
- Su, C. H., Velusamy, P., Kumar, G. V., Adhikary, S., Pandian, K., Anbu, P., 2017, "Studies of Antibacterial Efficacy of Different Biopolymer Protected Silver Nanoparticles Synthesized under Reflux Condition", *Journal of Molecular Structure*, Vol. 1128, pp. 718–723.
- Tabatabai, M. A., Bremner, J. M., 1969, "Use of P-Nitrophenyl Phosphate for Assay of Soil Phosphatase Activity", *Soil Biology and Biochemistry*, Vol. 1, No. 4, pp. 301–307.
- Thalman, A., 1968, "Zur Methodik der Bestimmung der Dehydrogenaseaktivit t im Boden mittels triphenyltetrazoliumchlorid (TTC)", *Landwirtsch Forsch*, Vol. 21, pp. 249–258.
- Wijnhoven, S. W. P., Peijnenburg, W. J. G. M., Herberts, C. A., Hagens, W. I., Oomen, A. G., Heugens, E. H. W., Roszek, B., Bisschops, J., Gosens, I., Van De Meent, D., Dekkers, S., De Jong, W. H., van Zijverden, M., Sips, A. J.A.M., Geertsma, R. E., 2009, "Nano-Silver – a Review of Available Data and Knowledge Gaps in Human and Environmental Risk Assessment", *Nanotoxicology*, Vol. 3, No. 2, pp. 109–138.
- Wright, A. F., Bailey, J. S., 2001, "Organic Carbon, Total Carbon, and Total Nitrogen Determinations in Soils of Variable Calcium Carbonate Contents Using a Leco CN-2000 Dry Combustion Analyzer", *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, Vol. 32, No. 19–20, pp. 3243–58.
- Yılmaz  zt rk, B., Yenice G rsu, B., Dağ,  ., 2020, "Antibiofilm and Antimicrobial Activities of Green Synthesized Silver Nanoparticles Using Marine Red Algae *Gelidium corneum*", *Process Biochemistry*, Vol. 89, pp. 208–219.
- Yiwei, A., Yunxia, Y., Shuanglong, Y., Lihua, D., Guorong, C., 2007, "Preparation of Spherical Silver Particles for Solar Cell Electronic Paste with Gelatin Protection", *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 104, No. 1, pp. 158–161.

- Yun'an Qing, L. C., Li, R., Liu, G., Zhang, Y., Tang, X., Wang, J., Liu, H., Qin, Y., 2018, " Potential Antibacterial Mechanism of Silver Nanoparticles and the Optimization of Orthopedic Implants by Advanced Modification Technologies", *International Journal of Nanomedicine*, Vol. 13, p. 3311.
- Zhang, C., Hu, Z., Deng, B., 2016, "Silver Nanoparticles in Aquatic Environments: Physiochemical Behavior and Antimicrobial Mechanisms", *Water Research*, Vol. 88, pp. 403–427.



ADVANCED TURKISH FAKE NEWS PREDICTION WITH BIDIRECTIONAL ENCODER REPRESENTATIONS FROM TRANSFORMERS

¹Mehmet BOZUYLA 

Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Denizli, TÜRKİYE
mbozuyula05@posta.pau.edu.tr

(Geliş/Received: 14.09.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 04.08.2022)

ABSTRACT: The increasing usage of social media and internet generates a significant amount of information to be analyzed from various perspectives. In particular, fake news is defined as the false news that is presented as factual news. Fake news are in general fabricated toward a manipulation aim. Fake news identification is in general a natural language analysis problem and machine learning algorithms are emerged as automated predictors. Well-known machine learning algorithms such as Naïve Bayes (NB) and Random Forest (RF) are successfully used for fake-news identification problem. Turkish is a morphologically rich language and it has agglutinative complexity that requires dense language pre-processing steps and feature selection. Recent neural language models such as Bidirectional Encoder Representations from Transformers (BERT) proposes an opportunity for Turkish-like morphologically rich languages a relatively straightforward pipeline in the solution of natural language problems. In this work, we compared NB, RF, Support Vector Machine (SVM), Naïve Bayes Multinomial (NBM) and Logistics Regression (LR) on top of correlation based feature selection and newly proposed Turkish-BERT (BERTurk) to identify Turkish fake news. And we obtained 99.90 % accuracy in fake news identification which is a highly efficient model without substantial language pre-processing tasks.

Keywords: Machine learning, Text mining, Bidirectional Encoder Representations from Transformers (BERT), Fake news, BERTurk

Çift Yönlü Transformatör Kodlayıcı Temsilleriyle Gelişmiş Türkçe Sahte Haber Tahmini

ÖZ: Sosyal medya ve internetin artan kullanımı, çeşitli açılardan analiz edilmesi gereken önemli miktarda bilgi üretmektedir. Bu bağlamda yalan haber, gerçek haber olarak sunulan asılsız haber olarak tanımlanmaktadır. Sahte haberler genellikle bir manipülasyon amacına yönelik olarak üretilir. Sahte haber tespiti, genel olarak bir doğal dil analiz problemidir ve otomatik tahmin ediciler olarak makine öğrenmesi algoritmaları kullanılmaktadır. Naïve Bayes ve Rastgele Orman gibi iyi bilinen makine öğrenme algoritmaları, sahte haber tanımlama sorunu için başarıyla kullanılmaktadır. Türkçe morfolojik olarak zengin bir dildir ve yoğun dil ön işleme adımları ve özellik seçimi gerektiren sondan eklemeli karmaşıklığa sahiptir. Transformer olarak bilinen Çift Yönlü Kodlayıcı Temsilleri (BERT) gibi son zamanlardaki sinirsel dil modelleri, Türkçe benzeri morfolojik olarak zengin diller için doğal dil problemlerinin çözümünde nispeten basit bir metot fırsatı sunmaktadır. Bu çalışmada, NB, RF, Destek Vektör Makinesi, Naïve Bayes Multinomial ve Lojistik Regresyon ile korelasyon tabanlı öznitelik seçimi ve yeni önerilen Türkçe-BERT (BERTurk) ile Türkçe yalan haberlerini tespit etmek için karşılaştırdık. Ön işleme adımları olmaksızın BERTurk ile sahte haber tanımlamada %99,90 doğruluk elde ettik.

Anahtar Kelimeler: Makina öğrenmesi, Metin madenciliği, Çift yönlü transformatör kodlayıcı temsilleri (BERT), Yalan haber, BERTurk,

1. INTRODUCTION

Fake news identification problem has recently gained an increasing focus among researchers due to the growing circulation of fake news through media platforms (D'Ulizia et al., 2021). Fake news issue is continuously disseminating because of digitalization of information. Fake news is explained as "Fake news is not simply false news. Its nature is determined by fraudulent content in news format as well as by an ability to travel as much as, and in some cases, even more than, authentic news" in European Commission report (Web1, 2018). From this point of view, as social media usage increases, the spread of fake news increases and this becomes a critical problem. Since internet or social media users may trust in digital platforms while accessing or exchanging information, there is a need to automated fake news filtering tools. An interesting example of the influence of fake news on public opinion is the United States presidential election in 2016. There was an intense debate that the public opinion manipulated through social media (particularly Facebook) circulated fake news (Flynn et al., 2017).

Automated fake news detection systems are in general rely on machine learning algorithms. More clearly, supervised learning policy is frequently used to develop various detection models on top of numerous language processing techniques. In this context, machine learning algorithms are trained with labeled fake news dataset and then tested on a data split to measure their performance (Alim et al., 2021). For English-like analytical languages this task is relatively straightforward. More clearly, the fake news detection pipeline requires the following steps for English-like analytical languages: First the labeled dataset is encoded with a vector space model to be able to train a classifier and then it is pre-processed with simple tasks such as stop-word removal. After this step, a feature selection mechanism may be preferred or not (Conroy et al., 2015). Then the obtained dataset used to train various machine learning algorithms such as NB, LR, SVM and RF. In case of morphologically rich languages the language processing pipeline is similar. However, Turkish being an agglutinative language, requires heavy pre-processing steps that effects the performance of classifiers (Uysal & Gunal, 2014). In more clear terms, the morphological complexity of agglutinative languages need numerous pre-processing steps such as stemming, lemmatization and feature engineering to obtain an efficient model. The difficulty in computational model generation of agglutinative languages is studied in detail by Oflazer (Oflazer, 2014). In this context, Turkish words take numerous inflectional and derivational suffixes and it is possible to derive a Turkish word that correspond to an English sentence (Oflazer, 2014):

yap+abil+ecek+se+niz -> if you will be able to do (it)

One of the main problem of Turkish morphology arises while obtaining vector space model for machine learning classifiers. More specifically, Turkish words are in general composed of morphemes that may result in data sparsity that may decrease performance of classifiers (Nuzumlalı & Özgür, 2014). The solution to this problem is relatively handled with stemming and lemmatization whose goals are obtaining base forms of words with reducing inflectional forms. These language tasks require specialized software or lexicons. We should emphasize that the mentioned tasks are required for traditional machine learning algorithms such as NB or SVM. On the other hand, recent advances in neural language models such as BERT (Devlin et al., 2019) (particularly BERTurk which is Turkish version of BERT) eliminate the need for the underlined pre-processing tasks while generating successful models for many language tasks for Turkish-like languages.

In this study, we made use of traditional classifiers on top of pre-processing tasks including feature selection and we compared the outcomes with BERTurk (Schweter, 2020) for fake news identification problem. One of the main contributions of this study is the usage of BERTurk model in detection of fake news. The second contribution of this study is the experiments that enlighten comparison of challenging Turkish language pipeline with that of BERTurk's relatively straightforward path.

This study is structured as follows: We present literature survey in Section 2 and the overall workflow is explained in Section 3. In Section 4, we make explanations of experiments and corresponding results. In section 5, we underline results of the experiments and we conclude the paper with Section 6 as conclusion.

2. RELATED WORK

Fake news detection is a frequently studied Natural Language Processing (NLP) problem in machine learning literature. For the sake of convenience, we narrow the literature survey in two aspects: i) Recent Turkish fake news studies and ii) Transformer based fake news literature.

Though Turkish is a widely spoken language, there are limited NLP studies in Turkish fake news detection. In their study, Mertoglu et al. generated a lexicon that may be used for fake news identification studies (Mertoğlu & Genç, 2020). Tocoglu et al. made use of various machine learning algorithms and feature selection engineering to generate an efficient fake news (satire) detection model. They obtained accuracy of 97.72% with the recurrent neural network algorithm (Onan & Tocoglu, 2020). Another recent study in Turkish is a clickbait dataset that is evaluated with Bidirectional Long Short-Term Memory (BiLSTM) and the authors obtained a 97% prediction accuracy (Genç & Surer, 2021). For Twitter fake news detection, the authors used RF algorithm to filter false news and they obtained 0.86 as average F1-score (Taşkın et al., 2021). As it is observed from this survey, Turkish fake news studies are infrequent in the literature.

We now present transformer based fake news detection literature that are conducted last two years. While we present the related literature, we particularly focus on non-English languages. In their BERT-base approach, Jwa et al. identified fake news stories in Korean (Jwa et al., 2019). For Urdu fake news identification, the authors compared machine learning algorithms with BERT and they obtained 0.90 F1 score for BERT outperforming all classifiers (Amjad et al., 2021). In their study, Nagadeh et al. used BERT with contextual speech information to analyze Persian fake news and they obtained promising results (Jahanbakhsh-Nagadeh et al., 2020). For Arabic fake news detection, the authors compared deep neural network models with BERT, and they found transformer model is superior to neural networks to detect Arabic fake news (Al-Yahya et al., 2021). Furthermore, Ozbay and Alatas made use of advanced artificial intelligence algorithm to analyze well-known fake-news datasets and they obtained efficient results in terms of accuracy (Ozbay & Alatas, 2020). In their another study, Ozbay and Alatas used metaheuristic optimization algorithms to identify fake-news automatically (Ozbay & Alatas, 2019). As a last study from recent fake-news research domain, Bozuyula and Ozcift analyzed popular fake-news source, i.e. COVID-19, with the use of neural transformers (Bozuyula & Özçift, 2022). There are many studies in the literature that use transformers in fake news detection. However for the sake of convenience we limit ourselves with a few work from literature. As an overview, we can draw two conclusions from this survey: i) Turkish fake news literature is limited in quantity and there is a research gap for researchers and ii) Transformer based approaches are the new direction particularly in fake news identification domain.

3. METHODOLOGY

In this section, we present the proposed transformer based Turkish fake news detection framework. The whole framework is divided into subsections and they are: data, pre-processing, feature extraction, feature selection, experimental setup. The evaluation metrics is followed the mentioned sub-tasks.

3.1 Data

The data consists of two subsets as fake and real news. For Turkish a rich fake news source is Zaytung web site which is famous in fabricating numerous types of fake data (Github, 2021; Web3, 2021). Fake news subset is generated from Zaytung and real subset is from Hurriyet newspaper. In the dataset, there are 2163 fake labeled samples and 2296 real labeled samples that consists of one or more sentences. The real news were taken from Hürriyet newspaper between dates of January and June 2019. The fake news was collected from the news published on the famous fake news resource, Zaytung, before June 2019. The collected news were in culture, politics, technology, sport, and science etc. domains. The average lengths of fake news and real news sentences are 212, 368 words respectively. Sample sentences from collected data for fake and real news are given in Table 1.

Table 1. Sample sentences from dataset

Turkish	English	Title
Hatay'da fren yerine gaza basan sürücü kızını ezdi. Hatay'da evinin bahçesine aracını park ederken fren yerine gaza basan sürücü, kızını ezdi. Minik kız çocuğu olay yerinde hayatını kaybetti.	In Hatay, the driver, who stepped on the gas instead of the brake, crushed his daughter. While parking his car in the garden of his house in Hatay, the driver, who stepped on the gas instead of the brake, crushed his daughter. The little girl died at the scene of accident.	Real
DİE: "Türk Kadınlarının % 97'si Hep İyi Niyeti Yüzünden Kaybediyor". DİE (Devlet İstatistik Enstitüsü) tarafından açıklanan rakamlara göre "hep iyi niyeti yüzünden kaybeden" Türk kadınlarının sayısı geçen yılın aynı dönemine göre 1 puan artarak %97'ye yükseldi. Yine aynı rapora göre Türk kadınlarının %94'ünün tek kusurları fazla dürüst olmaları ve diğer Türk kadınları gibi rol yapmayı bilmemeleri. Geri kalan %6'lık kısmın ise herhangi bir kusuru bulunmuyor.	TSI: "97% of Turkish Women Always Lose Their Goodwill". According to the figures announced by the TSI (Turkish Statistical Institute), the number of Turkish women who "always lose because of their goodwill" increased by 1 point to 97% compared to the same period of the previous year. they don't know how to act like other Turkish women. The remaining 6% do not have any defects.	Fake

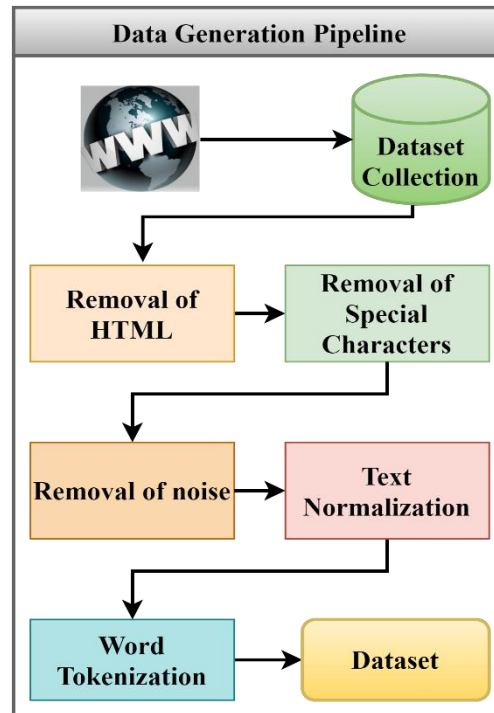
3.2 Pre-processing

The generated dataset is pre-processed with the following steps: i) html tags are removed, ii) special characters such as “*,@” are filtered, iii) noisy characters such as newlines, white-space are discarded, iv) text is encoded in lowercase characters i.e. normalized and finally v) tokenization, i.e. conversion of text strings into words. We provided the sample text before and after preprocessing in Table 2.

Table 2. Sentences before and after preprocessing steps

Text before preprocessing	Text after preprocessing
Ölümünün 14. yılında Barış Manço'yu şarkılarıyla anan sevenleri Kanlıca mezarlığını "haydi kızlar... ayı" sesleriyle inlettiler. Türk müziğinin unutulmaz seslerinden Barış Manço aramızdan ayrılışının 14. yılında ailesi ve sevenleri tarafından Beykoz Kanlıca'daki kabri başında anıldı. Anma töreninde Manço'nun en sevilen şarkıları her sene olduğu gibi yine hep bir ağızdan seslendirilirken bu yıl repertuara eklenen ayı şarkısı sayesinde Kanlıca mezarlığı renkli görüntülere sahne oldu.	ölümünün 14 yılında barış manço'yu şarkılarıyla anan sevenleri kanlıca mezarlığını haydi kızlar ayı sesleriyle inlettiler türk müziğinin unutulmaz seslerinden barış manço aramızdan ayrılışının 14 yılında ailesi ve sevenleri tarafından beykoz kanlıcadaki kabri başında anıldı anma töreninde mançonun en sevilen şarkıları her sene olduğu gibi yine hep bir ağızdan seslendirilirken bu yıl repertuara eklenen ayı şarkısı sayesinde kanlıca mezarlığı renkli görüntülere sahne oldu
DİE (Devlet İstatistik Enstitüsü) tarafından açıklanan rakamlara göre "hep iyi niyeti yüzünden kaybeden" Türk kadınlarının sayısı geçen yılın aynı dönemine göre 1 puan artarak %97'ye yükseldi.Yine aynı rapora göre Türk kadınlarının %94'ünün tek kusurları fazla dürüst olmaları ve diğer Türk kadınları gibi rol yapmayı bilmemeleri. Geri kalan %6'lık kısmın ise herhangi bir kusuru bulunmuyor.	die devlet istatistik enstitüsü tarafından açıklanan rakamlara göre hep iyi niyeti yüzünden kaybeden türk kadınlarının sayısı geçen yılın aynı dönemine göre 1 puan artarak 97 ye yükseldi yine aynı rapora göre türk kadınlarının 94 ünün tek kusurları fazla dürüst olmaları ve diğer türk kadınları gibi rol yapmayı bilmemeleri geri kalan 6 lık kısmın ise herhangi bir kusuru bulunmuyor.

The whole preprocessing pipeline is presented in Figure 1.

**Figure 1.** Data pre-processing framework.

3.3 Feature Extraction and Feature Selection

Having tokenized the dataset, we need to obtain the weight of each word in the whole data. This is a well-known concept in computational language processing literature. In this aspect, the frequency of terms, i.e. Term Frequency (TF) and Inverse Document Frequency (IDF) concepts are used to obtain final optimum weights of terms (words) in the dataset and this is calculated with Equation 1.

$$w_{ij} = tf_{ij} * \log \frac{N}{df_i} \quad (1)$$

In Equation 1, w_{ij} is weight of a term i in the sample j , N is total sample size in the dataset, tf_{ij} corresponds to the frequency of term i in the sample j , and finally df_i corresponds to the number of samples that contain term i (Dadgar et al., 2016).

With this transformation the dataset is now encoded in terms of numerical values that is suitable for machine learning algorithms.

After feature extraction, we obtained 1413 terms for two classes. We used WEKA machine learning package to obtain feature extraction based on TF-IDF. Some example terms having highest TF-IDF score and corresponding weights are given in Table 3.

Table 3. TF-IDF scores of words with highest weights

Word	TF-IDF weight	Word	TF-IDF weight
tekstil	3.947	meslek	3.427
yapılacaktır	3.821	adaylar	3.422
ödeme	3.682	sanat	3.362
sınav	3.491	sistem	3.321
kayıt	3.444	oruç	3.285

It is also underlined in the literature that high dimensional nature of data may decrease performance of machine learning algorithms. Feature selection is in general used to obtain the most discriminative feature (term or word in text mining literature) that maximizes classifier performance. From this perspective, we experimented Correlation-based Feature Selection (CFS) method with best first search strategy. The feature (term) size before feature selection was 1413 and with the application of Correlation-based Feature Selection (CFS) method with best first search strategy, we obtained feature size of 200. The first twelve words with the highest weight (importance) are given in Table 4. The corresponding experimental results are presented in Section 4.

Table 4. Some of the most important terms obtained with CFS

aslinda	arkadaş	adeta	bile
deneyimli	gergin	halen	ifade
itiraf	komple	resmen	zamanında

3.4 Experimental Setup

In this work, we used five machine learning classifiers, NB, LR, RF, SVM, NBM and BERTurk from literature (Sarker, 2021). The experimental setup is realized in three steps.

(1) Full data without feature selection: The dataset is first divided in 80% train and 20% test splits. Then the classifiers are trained with 80% portion of data and then the performance of the models are evaluated with the test-split in detecting fake news. In the literature, there are various data splits such as 70%-30% and 80%-20% for train test scheme. Also, a widely used train-test split is cross validation. However, for BERT-like transformers cross-validation split requires huge computational load and we

therefore selected 80%-20% for all the experiments carried in the study. This pipeline is shown in Figure 2.

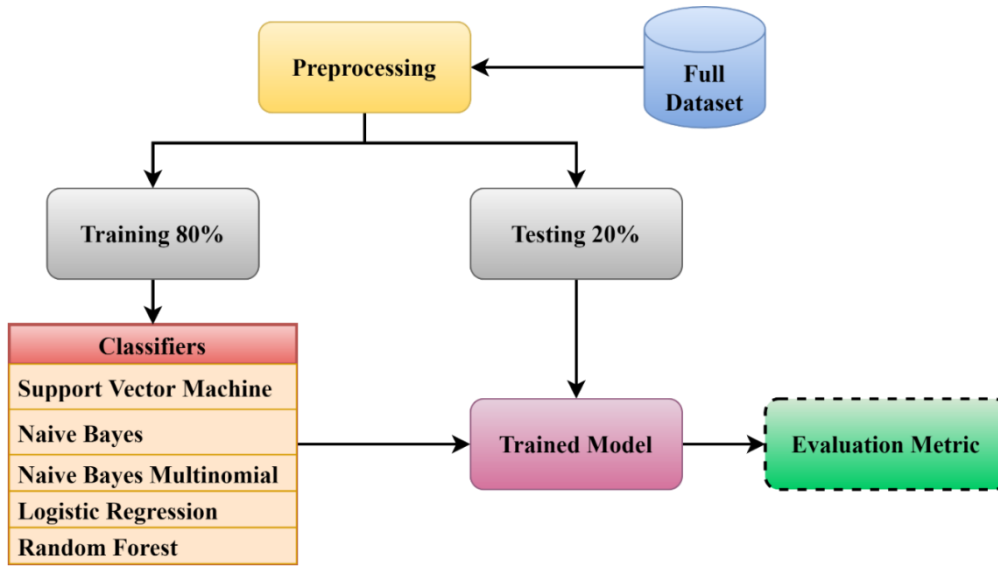


Figure 2. Fake news model generation without feature selection

(2) In this experimental setup, the data is first processed with CFS and then the reduced dataset is then divided into 80-20 train test splits. Then the classifiers are trained and tested as shown in the Figure 3.

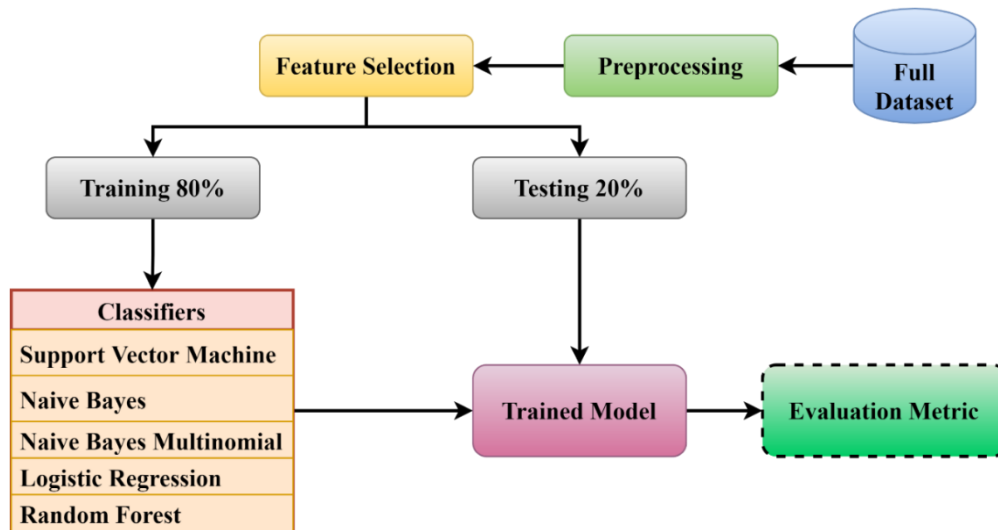


Figure 3. Fake news model generation with Correlation-Based feature selection

(3) BERTurk makes use of full feature set and it does not require dense pre-processing steps. The train and test splits for BERTurk are the same and the framework is summarized in Figure 4.

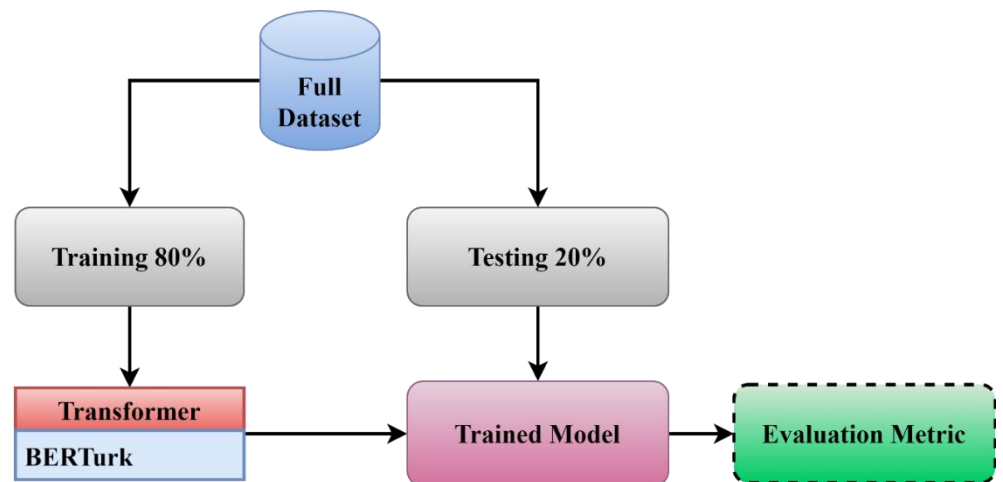


Figure 4. BERTurk fake detection generation model pipeline

3.5 Evaluation Metrics

Comparing real-world performances of classifiers are realized on the basis of numerical metrics such as accuracy. For balanced problems, i.e. number of samples in classes are distributed evenly, Accuracy (Acc) is a preferred evaluation metric (Wardhani et al., 2019)(Sasikala et al., 2017). Acc is based on confusion matrix and it is calculated as in Equation 2.

$$Acc = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (2)$$

In Equation 2, True Positives (TP) and True Negatives (TN) are the correct predictions. False Negatives (FN) and False Positives (FP) are the incorrect predictions in the equation.

Though Acc is efficiently used to compare classifier performances, statistical validation of models require another metric such as Kappa (K_p) [23]. Kappa is calculated with Equation 3 and it generates values between $[0,1]$.

$$K_p = \frac{p_0 - p_e}{1 - p_e} \quad (3)$$

Where p_0 and p_e

$$p_0 = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (4)$$

$$p_e = \frac{(TP + FN) \cdot (TP + FP) + (FN + TN) \cdot (FN + TN)}{(TP + TN + FP + FN)^2} \quad (5)$$

If the generated K_p value of a classifier is above 0.8 then it is statistically validated. The K_p and Acc values of all classifiers are evaluated and discussed in Section 4.

4. RESULT AND DISCUSSION

In this section, we summarize the experimental results of used algorithms in terms of Acc , K_p and confusion matrix. The Acc and K_p metrics of all classifiers are given in Table 5 and confusion matrices (Dağlı & Öztürk, 2021; Khorram & Baykan, 2021) of algorithms given in Table 6, Table 7 and Table 8 .

Table 5. Experimental results of fake news classification models

Classifier	Full Dataset		Dataset with Feature Selection	
	Acc	Kp	Acc	Kp
NB	.891	.838	.919	.783
NBM	.967	.850	.925	.935
LR	.869	.737	.942	.883
SVM	.985	.894	.947	.971
RF	.937	.881	.941	.874
BERTurk	.999	.995	-	-

Table 6. The confusion matrices of machine learning algorithms

	Confusion Matrix for NB+FS		Confusion Matrix for NBM+FS		Confusion Matrix for LR+FS		Confusion Matrix for SVM+FS		Confusion Matrix for RF+FS	
	Actual		Actual		Actual		Actual		Actual	
	Real	Fake	Real	Fake	Real	Fake	Real	Fake	Real	Fake
Predicted	389	35	438	16	428	29	447	9	429	34
	62	406	13	425	23	412	4	432	22	407

Table 7. The confusion matrices of machine learning algorithms with FS

	Confusion Matrix for NB+FS		Confusion Matrix for NBM+FS		Confusion Matrix for LR+FS		Confusion Matrix for SVM+FS		Confusion Matrix for RF+FS	
	Actual		Actual		Actual		Actual		Actual	
	Real	Fake	Real	Fake	Real	Fake	Real	Fake	Real	Fake
Predicted	418	39	425	41	428	29	438	34	437	39
	33	402	26	400	23	412	13	407	14	402

Table 8. The confusion matrix of BERT

	Confusion Matrix for BERT	
	Actual	
	Real	Fake
Predicted	451	1
	0	440

From confusion matrix evaluation point of view, we observe from Table 6, Table 7 and Table 8 that most of the algorithms are more capable to identify real news compared to fake news. Furthermore, SVM is able to determine real and fake news with only 13 mistakes in terms of FP and FN. The best performance to discriminate real and fake news is achieved by BERTurk with only one mistake.

We can easily observe from Table 5 that BERTurk model generates an outstanding fake detection performance in terms of accuracy. While BERTurk is able to identify fake news with 99.90 % accuracy, the

fake news identification value of SVM is 98.50 %. Another point drawn from Table 5 is that CFS feature selection may increase performance of some classifiers such as NB, LR, and RF, the *Acc* values of NBM and SVM are decreased. As we underlined in the article, for Turkish an efficient model requires to optimize various parameters (pre-processing, feature filtering etc.) at the same time to obtain an acceptable model. For the sake of simplicity, we compare the performances of the algorithms in Figure 5.

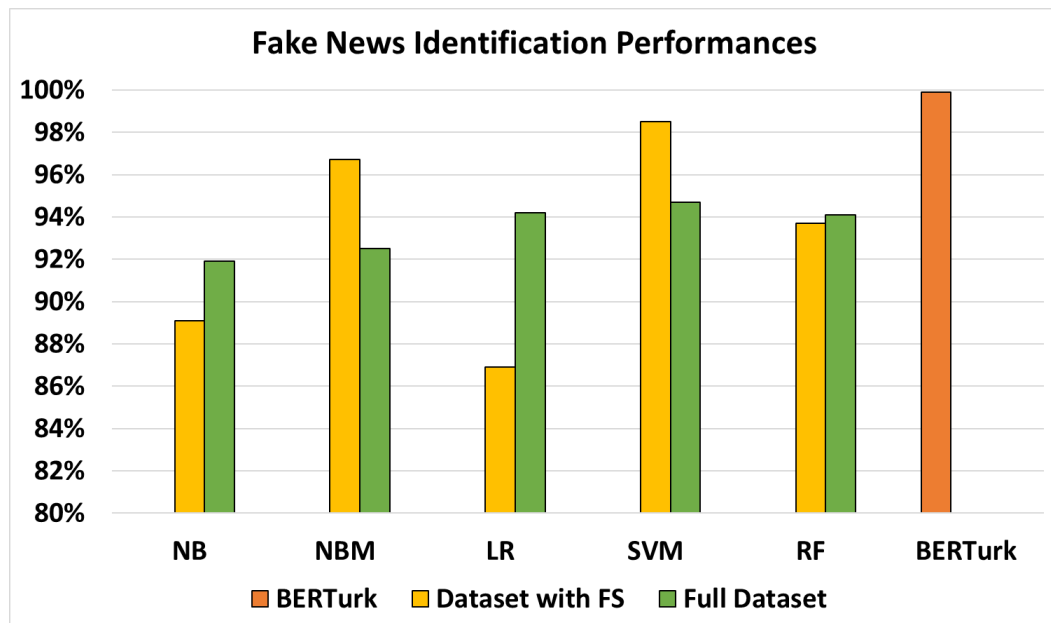


Figure 5. Comparison of performances of classifiers in terms of fake news identification accuracies.

As we obtained the best fake news identifier to be BERTurk, we now need to statistically validate the classifiers. In order to visualize K_p values from Table 5, we draw Figure 6 as follows:

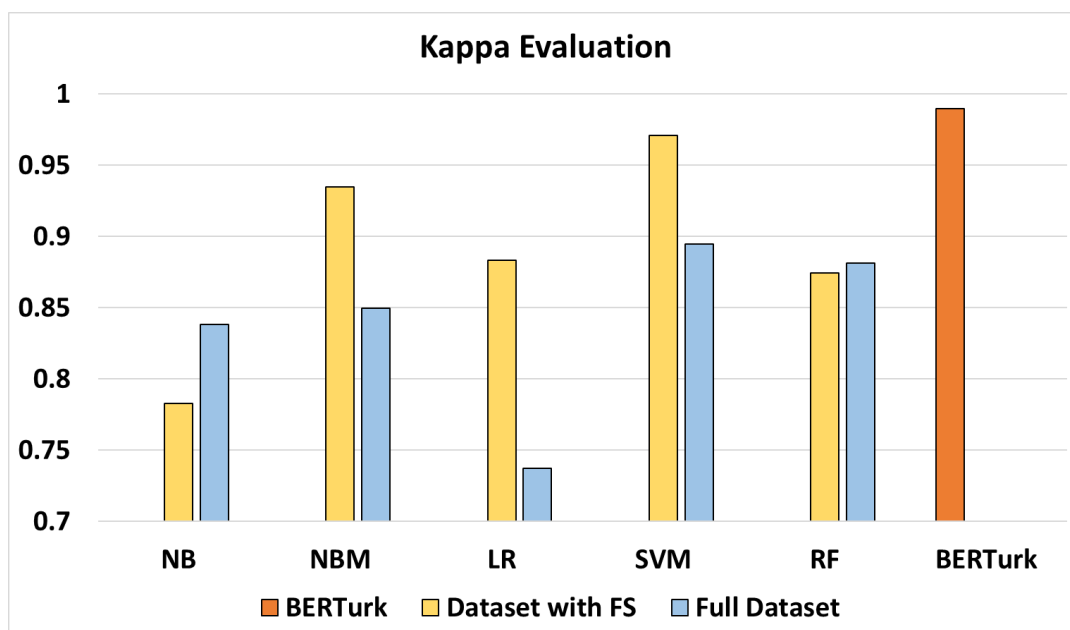


Figure 6. Statistical evaluation of classifiers with K_p values.

From Figure 6, we may first conclude that most of the models have K_p values higher than 0.8 and they are statistically validated. And finally, we also observe from Figure 6 that BERTurk has a K_p value about 1 that is well acceptable.

5. CONCLUSION

In general, Turkish computational language studies require language pre-processing steps and feature selection mechanisms to obtain a relevant model. One of the main drawbacks of this approach is that the mentioned tasks cannot be assembled into a well-defined pipeline and it requires lots of trial-error approaches while obtaining an efficient model. On the other hand, BERTurk-like transformers do not require mentioned processing tasks and they can process relatively raw data without feature selection. In this study, we use two types of classifiers as traditional algorithms such as NB, RF and a recently developed transformer, i.e. BERTurk, to detect Turkish fake news. And the experimental results show that transformer based approach is relatively straightforward method with outperforming fake news identification performance compared to the rest of the classifiers. As a research direction, we recommend transformers to be a better choice for Turkish language processing tasks.

6. REFERENCES

- Al-Yahya, M., Al-Khalifa, H., Al-Baity, H., Alsaeed, D., & Essam, A., 2021, "Arabic Fake News Detection: Comparative Study of Neural Networks and Transformer-Based Approaches", *Complexity*.
- Alim, A. A. A., Ayman, A., Praveen, K. D., & Myung, S. C., 2021, "Detecting Fake News using Machine Learning: A Systematic Literature Review", *ArXiv Preprint ArXiv:2102.04458*.
- Amjad, M., Sidorov, G., Zhila, A., Gelbukh, A., & Rosso, P., 2021, "Overview of the shared task on fake news detection in urdu at FIRE 2020", *CEUR Workshop Proceedings*.
- Bozuyula, M., & Özçift, A., 2022, "Developing a fake news identification model with advanced deep language transformers for Turkish COVID-19 misinformation data", *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 30(3), 908–926.
- Conroy, N. J., Rubin, V. L., & Chen, Y., 2015, "Automatic deception detection: Methods for finding fake news", *Proceedings of the Association for Information Science and Technology*, 52(1), 1–4.
- D'Ulizia, A., Caschera, M. C., Ferri, F., & Grifoni, P., 2021, "Fake news detection: A survey of evaluation datasets", *PeerJ Computer Science*, 1–34. <https://doi.org/10.7717/PEERJ-CS.518>
- Dadgar, S. M. H., Araghi, M. S., & Farahani, M. M., 2016, "A novel text mining approach based on TF-IDF and support vector machine for news classification", *2016 IEEE International Conference on Engineering and Technology (ICETECH)*, 112–116.
- Dağlı, İ., & Öztürk, A., 2021, "Görüntü Sınıflandırmada Derin Öğrenme Yöntemlerinin Karşılaştırılması", *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(4), 872–888.
- Devlin, J., Chang, M.-W., Lee, K., & Toutanova, K., 2019, "BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding", *ArXiv Preprint ArXiv: 1810.04805v2*, 4171–4186.
- Flynn, D. J., Nyhan, B., & Reifler, J., 2017, "The Nature and Origins of Misperceptions: Understanding False and Unsupported Beliefs About Politics", *Political Psychology*, 38, 127–150.
- Genç, Ş., & Surer, E., 2021, "ClickbaitTR: Dataset for clickbait detection from Turkish news sites and social media with a comparative analysis via machine learning algorithms", *Journal of Information Science*, 1–20, <https://doi.org/10.1177/01655515211007746>.
- Github, 2021, *GitHub - sfkcok/TurkishFakeNewsDataset: This is the repository of Turkish fake news dataset which consists of Zaytung posts and Hurriyet news articles*.
- Jahanbakhsh-Nagadeh, Z., Feizi-Derakhshi, M. R., & Sharifi, A., 2020, "A semi-supervised model for Persian rumor verification based on content information", *Multimedia Tools and Applications*, 1–29, <https://doi.org/10.1007/s11042-020-10077-3>.
- Jwa, H., Oh, D., Park, K., Kang, J. M., & Lim, H., 2019, "exBAKE: Automatic fake news detection model based on Bidirectional Encoder Representations from Transformers (BERT)", *Applied Sciences*, 9(19), 4062, <https://doi.org/10.3390/app9194062>.
- Khorram, T., & Baykan, N. A., 2021, "Network Intrusion Detection using Optimized Machine Learning Algorithms", *European Journal of Science and Technology*, 25, 463–474.

- Mertoğlu, U., & Genç, B., 2020, "Lexicon generation for detecting fake news", *ArXiv Preprint ArXiv: 2010.11089*, 1–16, <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2010/2010.11089.pdf>.
- Nuzumlalı, M. Y., & Özgür, A., 2014, "Analyzing Stemming Approaches for Turkish Multi-Document Summarization", *2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP)*, 702–706, <https://github.com/manuyavuz/>.
- Oflazer, K., 2014, "Turkish and its challenges for language processing", *Language Resources and Evaluation*, 48(4), 639–653, <https://doi.org/10.1007/s10579-014-9267-2>.
- Onan, A., & Tocoğlu, M. A., 2020, "Satire identification in Turkish news articles based on ensemble of classifiers", *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 28(2), 1086–1106.
- Ozbay, F. A., & Alatas, B., 2019, "A Novel Approach for Detection of Fake News on Social Media Using Metaheuristic Optimization Algorithms", *Elektronika Ir Elektrotehnika*, 25(4), 62–67.
- Ozbay, F. A., & Alatas, B., 2020, "Fake news detection within online social media using supervised artificial intelligence algorithms", *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 540, 123174.
- Sarker, I. H., 2021, "Machine Learning: Algorithms, Real-World Applications and Research Directions", *SN Computer Science*, 2(160), 1–21.
- Sasikala, B. S., Biju, V. G., & Prashanth, C. M., 2017, "Kappa and accuracy evaluations of machine learning classifiers", *2017 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*, 20–23.
- Schweter, S., 2020, *BERTurk - BERT models for Turkish*.
- Taşkın, S. G., Küçüksille, E. U., & Topal, K., 2021, "Twitter üzerinde Türkçe sahte haber tespiti", *Balikesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23(1), 151–172.
- Uysal, A. K., & Gunal, S., 2014, "The impact of preprocessing on text classification", *Information Processing & Management*, 50(1), 104–112.
- Wardhani, N. W. S., Rochayani, M. Y., Iriany, A., Sulistyono, A. D., & Lestantyo, P., 2019, "Cross-validation Metrics for Evaluating Classification Performance on Imbalanced Data", *2019 International Conference on Computer, Control, Informatics and Its Applications*, 14–18.
- Web1, 2018, *Fake News and Disinformation Online Report*, European, Commission, <https://europa.eu/eurobarometer/surveys/detail/2183>.
- Web3, 2021, *Zaytung.Com*, <https://www.zaytung.com/>.



A SYSTEMATIC AND EFFICIENT INPUT SELECTION METHOD FOR ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS USING MIXED-INTEGER NONLINEAR PROGRAMMING

¹Hasan SILDİR , ²Erdal AYDIN 

¹Gebze Technical University, Chemical Engineering Department, Kocaeli, TURKIYE

²Koc University, Chemical and Biological Engineering Department, Istanbul, TURKIYE

hasansildir@gtu.edu.tr, eyadin@ku.edu.tr

(Geliş/Received: 22.02.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 04.08.2022)

ABSTRACT: Selection of input variables of the empirical models has vital effect on the prediction performance, reduced overfitting and reduced computational load. Various trials and error and sequential methods in the literature to deal with input selection for artificial neural networks (ANNs). However, these methods are not considered as automatic and systematic. This study proposes a novel and efficient mixed integer nonlinear programming-based approach to handle optimal input selection and the ANN training simultaneously for classification problems. Such selection uses binary (0-1) variables to represent the presence of the input variables and trains traditional continuous network weights simultaneously. Two classification case studies are given to demonstrate the advantages by using widely used data sets and statistical measures. The first data set is related to the characterization of the type of a tumor related to breast cancer, the second data set is about predicting the type of a biotechnological product using different features, the last one is related to heart failure prediction. Results show that better test performance can be achieved with optimally selected inputs, resulting in reduced overfitting. The proposed approach delivers a significant advantage during the design and training of the ANNs and is also applicable to other empirical models.

Keywords: Input selection, Artificial neural networks, Mixed-integer programming

Kesikli ve Sürekli Optimizasyon Kullanarak Yapay Sinir Ağları için Sistematik Girdi Seçimi Yöntemi

ÖZ: Ampirik modellerin girdi değişkenlerinin seçimi, tahmin performansı, azaltılmış fazla uydurma ve hesaplama yükünün azaltılması üzerinde önemli etkiye sahiptir. Literatürde yapay sinir ağları (YSA) için girdi seçimi ile ilgili çeşitli deneme yanılma yöntemleri mevcuttur ancak bu metodlar sistematik ve otomatik olarak kabul edilmemektedir. Bu çalışma, sınıflandırma problemleri için optimal girdi seçimi ve YSA eğitimini aynı anda ele almak için yeni ve verimli bir karma tamsayı doğrusal olmayan programlama tabanlı bir yaklaşım önermektedir. Bu seçim, girdi değişkenlerinin varlığını temsil etmek için ikili (0-1) değişkenleri kullanır ve geleneksel sürekli ağ ağırlıklarını veya parametrelerini aynı anda eğitir. Yaygın olarak kullanılan veri setleri ve istatistiksel ölçümler kullanarak avantajları göstermek amacıyla üç sınıflandırma vaka çalışması sunulmuştur. Birinci veri seti meme kanseri ile ilgili tümörün tipin-in karakterizasyonu ile ilgili olup, ikinci veri seti ise farklı özellikler kullanılarak bir biyoteknolojik ürünün tipinin tahmin edilmesi ile ilgilidir, son veri seti ise kalp sağlığı ile ilgilidir. Sonuçlar, optimal olarak seçilen girdiler ile düşük fazla uydurma sayesinde daha iyi test performansının elde edilebileceğini göstermektedir. Önerilen yaklaşım, YSA'ların tasarımı ve eğitimi sırasında önemli bir avantaj sağlar ve diğer ampirik modellere de uygulanabilir.

Anahtar Kelimeler: Girdi Seçimi, Yapay sinir ağları, Kesikli ve sürekli optimizasyon

1. INTRODUCTION

Modeling of complex processes are primarily handled through mechanistic or empirical models. The mechanistic models contain mathematical expressions with the actual physical dynamics. Thus, such models have a more trustable nature to extrapolation. On the other hand, the derivation of such models is a challenging task due to experimental challenges and the theoretical issues related to knowledge on underlying mechanism.

Empirical models, with a high number of varieties, deliver an alternative to mechanistic models once the data are abundant and the processing conditions are similar or within an acceptable extrapolation region although they are constructed on tailored black-box mathematical formulations with no physical background.

ANNs are one type of empirical models and have obtained gradually obtained more attention over the past decades both due to increased computational power and data availability. Feedforward ANNs propagate the input information, which is represented by a vector for a particular sample, to succeeding layers through linear and nonlinear operations, which incorporate the elements of input vector with different weights. Traditionally, all ANN variables interact in a fully connected sense.

ANNs have found different application areas both due to their flexibility to represent complex interactions and theoretical modifications resulting in a different terminology despite underlying logic is based on regression. In (Mutlu and Yucel 2018), artificial intelligence based methods have been used for the prediction of biomass gasification reaction. (Akdag, Komur, and Ozguc 2009), used ANNs for the calculation of heat transfer related parameters from an experimental apparatus. Furthermore, ANNs have found significant applications in time-series data both from the manufacturing processes and economics. In (Kocak and Un 2014), gold price estimations were considered. An application on environmental studies can be found in (Yetilmezsoy, Ozkaya, and Cakmakci 2011). Electricity consumption using ANNs is applied by (Azadeh, Ghaderi, and Sohrabkhani 2008).

A major problem with the ANN is the scalability and the management in real time when high number of inputs are candidates for the model development since measurements and advanced sensor technology provide a significant amount of different data, some of which are redundant or correlated. There are various trial and error and sequential input selection methods for the ANNs (Castellano and Fanelli 2000; Leahy, Kiely, and Corcoran 2008; Verikas and Bacauskiene 2002) combine the tools from optimization and statistics.

In theory, higher number of inputs, especially when they are redundant or do not carry additional statistical insight, contribute to famous overfitting problem by introducing more weights to the architecture and bringing about significant computational load with parameter identifiability issues (Schittkowski 2007). A representative input subset selection has been a focus for the development of more efficient and accurate predicting ANN architectures with improved computational performance.

In (Verikas and Bacauskiene 2002), an input reduction method is implemented on publicly available benchmark problems and provides a similar performance with smaller input subspace. The input selection might in turn delivering a better or a similar performance in the test data despite reduced training performance. Such a performance drop in training is theoretically intuitive as less parameters are included in the optimization problem with fewer inputs. However, the impact on the test instances is beneficial for many cases (Ledesma et al. 2008; Sildir, Aydin, and Kavzoglu 2020).

There are various input selection algorithms in the literature (Castellano and Fanelli 2000; Van De Wal and De Jager n.d.). Those methods usually handle the input reduction in a computationally simplified domain by excluding the non-convex and non-smooth optimization problem, focusing on statistical significance among variables or straightforward interactions between inputs and outputs. Next, the resulting input subset is used for the development of ANNs. A major theoretical challenge with such approaches is the compatibility of the inputs for the ANN development although they are obtained from a simplified set of interactions rather than the actual ANN formulation during the selection. In addition, those inputs are selected using a sequential manner, which requires the successive and recursive process in which only one input is removed per iteration. Thus, any theoretical potential from the co-existence of

inputs can not be exploited due to the heuristic nature of the approach. On the other hand, such sequential input selection algorithms have found significant applications (Rückstieß, Osendorfer, and Smagt 2011) due to its practical usage and satisfactory performances once the data do not contain significant nonlinearity and complexity. With many variations (Aha and Bankert 1996), the cross-validation score is a popular approach to eliminate or add an input (Ferri et al. 1994). The method is also used in this study for the comparison purposes.

One more typical solution to cope with overfitting is to include a regularization term to penalize larger values of ANN parameters during the NLP (Non-linear programming) solution, which unfortunately cannot regularize the hyper parameters (Manngård, Kronqvist, and Böling 2018). Dropout regularization is an alternative and efficient method to include structure detection element into ANNs, using random sampling based techniques (Poernomo and Kang 2018). Another recent advancement related to feature selection includes Bayesian optimization-based methods. These methods are not non-parallelizable, but also often converge to suboptimal local solutions, which in turn brings about poor performance for feature selection. On the other hand, efficient decomposition algorithms are present for larger search spaces, integrating the derivate-based and blackbox optimization approaches for the solution of mixed integer nonlinear programming (MINLP), (Diaz et al. 2017; Feurer and Hutter 2019; Stamoulis et al. 2018).

This study focuses on the development of an MINLP formulation for the simultaneous design and the training of feedforward ANNs by representing the selection of the inputs by a binary decision variable in addition to traditional continuous ANN weights. This approach obtains the structure and the weights of the ANN automatically and simultaneously, unlike sequential feature algorithms. Thus, resulting best features are selected considering the ANN architecture, in addition to traditional concerns such as accuracy, and ensures a satisfactory performance with the subset. Furthermore, in theory, MINLP problems can be solved to global optimum in theory, guaranteeing to achieve the best possible feature selection (Sahinidis 1996). Finally, the decomposable structure of the resulting mathematical optimization formulations also increases the potential of the proposed methods for large-scale data sets, unlike the cutting-edge Bayesian optimization or sequential feature selection methods.

The rest of the paper is organized as follows: Section 2 includes the theoretical background of the approach. Section 3 provides the results and comparison to ANNs with all inputs. The last section concludes the study.

2. Methodology

2.1 Theoretical Background

Traditional feedforward ANN applications comprise of fully connected networks where all inputs, hidden layer neurons and outputs are connected completely, in a fully-connected manner. These ANNs are typically defined as follows:

$$y = f_{OL}(W_{OL} \cdot f_{HL}(W_{HL} \cdot u + B_{HL}) + B_{OL}) \quad (1)$$

where y is the vector of outputs; W_{HL} and B_{HL} are the matrices of hidden layer weights and bias vector respectively; W_{OL} and B_{OL} are the matrices of output layer weights and bias vector respectively; u is the vector of inputs or features; f_{HL} and f_{OL} are hidden layer and output layer activation functions respectively. The mathematical representation given by Eq. 1 represents a fully connected feedforward artificial neural network (FC-ANN) which transforms the information in input, u , to the succeeding layers, and eventually to the output vector, y . The dimensions of ANN weights in Eq. 1 depend on the number of inputs, outputs and number of neurons (a hyper parameter), which are determined manually before training. In general, as the dimensions get larger, higher number of connections and parameters are introduced, which in turn provides higher capability of fitting to the training data. More parameters can also be introduced by

adding more hidden layers, and thus connections. This task lies within the concept of deep learning, providing beneficial application pathways in the literature (Alom et al. 2019).

2.2 Proposed Method

The hyperparameter management of ANNs is a challenging task since it requires significant number of trials. The common approach to especially decide on which input to select through ANN training is trial and error, where sequential selection and training steps are followed. In practice, those hyperparameters include the number of neurons, selection of inputs, and selection of activation functions. For instance, f_{HL} has a wide range of functions to address the different dataset and training algorithm needs, unlike f_{OL} , which is restricted to some form of normalization function once the classification is under consideration. In this case, a *softmax* activation used to calculate the probabilities of the outputs. Using the *softmax* function, the probability of j^{th} output, y_j , based on a particular vector, v , is calculated from:

$$y_j = \frac{e^{v_j}}{\sum_{i=1}^M e^{v_i}} \quad (2)$$

where M is the number of outputs. In ANN applications, the vector v for the calculation of the output probabilities are delivered by the hidden layer, due to feedforward information flow throughout the network.

ANNs are traditionally trained using nonlinear optimization methods where the sum of squared errors, or similar metrics, is minimized. As a result, optimal network parameters are obtained. Such a nonlinear optimization problem assumes a fixed ANN architecture including all the inputs in the dataset, in general.

In this study, the main idea is to represent the existence of the features using a binary variable and embed the selection procedure into the training algorithm, which in turn results in an MINLP problem. Accordingly, the training problem can be utilized simultaneously with the feature selection in a rigorous way, unlike many other sequential feature selection methods. The MINLP problem formulated to address both the input selection and training is given by:

$$\begin{aligned} \min_{W_{OL}, W_{HL}, B_{OL}, B_{HL}, u_s} z &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M -y_{ij}^{measurement} \cdot \ln(y_{ij}) \\ &s.t. \\ y_i &= f_{OL}(W_{OL} \cdot f_{HL}(W_{HL} \cdot u_i + B_{HL}) + B_{OL}), \in \{1, \dots, N\} \\ W_{HL}^{ij} &\leq W_{HL}^{max} \cdot u_s^j, i \in \{1, \dots, neuron\}, j \in \{1, \dots, inputs\} \\ W_{HL}^{ij} &\leq W_{HL}^{max} \cdot u_s^j, i \in \{1, \dots, neuron\}, j \in \{1, \dots, inputs\} \\ \sum_{i=1}^U u_{s,i} &= u_{desired} \\ u_s &\in \{0,1\} \end{aligned} \quad (3)$$

where z is the cross-entropy function, u_s is the binary vector includes the decision variable to select a particular input to account for in the ANN architecture; where u_i is the vector of i^{th} inputs; y_i is the vector of i^{th} output. This way, the most statistically major inputs can be selected while minimizing the traditional cross-entropy formulation. Please note that the major difference of Eq.3 to Eq.1 is the inclusion of the

binary input selection vector, u_s , embedded into the ANN equation. This way, the optimization detects whether or not to use the information from the particular feature value while training the ANN. Computation of the output variable given by Eq. 3 for a particular input sample, u , requires both the value of continuous weights (or parameters) and bias values, and binary input selection decision variables to be computed during training. Thus, to detect the optimal inputs and train the ANN network systematically and in a simultaneous fashion, a mixed-integer nonlinear optimization problem is formulated. Additional linking constraints given by Eq. 3 ensure setting the weights for the columns, which correspond to the eliminated inputs, to zero. On the other hand, the same constraints ensure the weight limits of the columns, tightening the search space to favor computational efficiency. To the best of the author's knowledge, formulation of the presented method as a mixed-integer nonlinear programming for classification problems in a systematic, where the nonlinearity of the ANN networks are considered, is still a scarce subject. Eq.3, on the other hand, represents a highly non-convex mixed-integer nonlinear programming problem, whose solution to global optimality is a quite challenging task. Solving MINLP problems requires branching on binary variables and solving the corresponding NLP relaxations at the same time. Derivative-based and derivative-free methods are available for the solution of the problem. For this work, a derivative-based local MINLP solver (DICOPT) is used, but evolutionary algorithms (e.g. genetic algorithm) may turn out to be useful for identifying a heuristic or initial solution. The major contribution of this study includes the development of Eq. 3 to address the simultaneous input selection and ANN training using rigorous optimization formulation, rather than evolutionary algorithms. Suggested formulation is applied in PYOMO language and the related MINLP problem is solved using the DICOPT solver (Hart, Watson, and Woodruff 2011; Kocis and Grossmann 1989). PYOMO is an internationally recognized open-source algebraic optimization modeling language which provides a user-friendly environment. Several useful open-source MINLP solvers can also be integrated in PYOMO (Kronqvist et al. 2019). Optimal results were obtained in less than 30 seconds for all of the cases given in results section.

For detailed explanation of MINLP problems and related solution algorithms, the reader is referred to (Kronqvist et al. 2019). Finally, a flowchart of the proposed method is represented below:

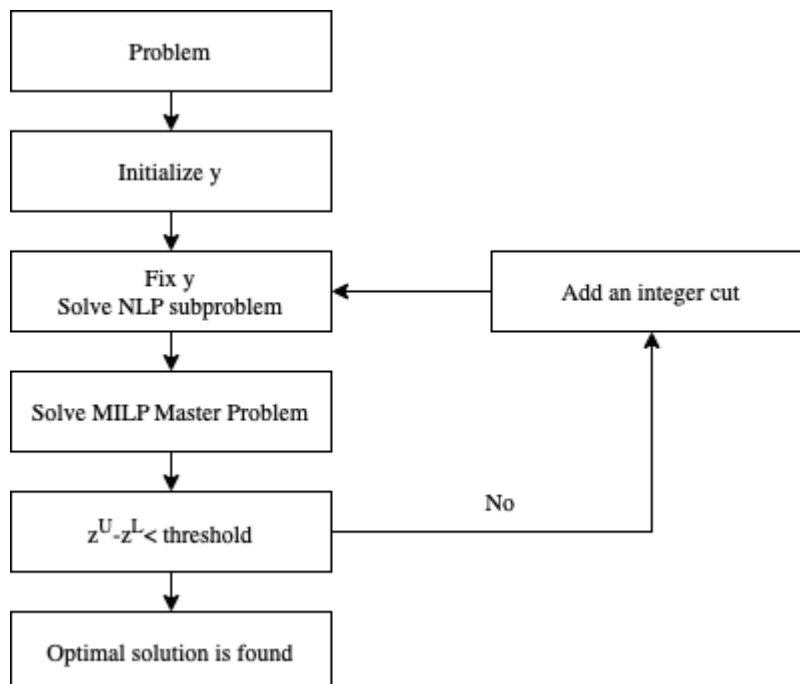


Figure 1: Flowchart of the solution of the MINLP problem using Outer Approximation (Duran and Grossmann 1986).

Here, y represents the set of binary variables comprised of the candidate features and the NLP subproblem represents the standard ANN training. z^u and z^l are the upper and the lower bounds of the objective function for the problem defined by Eq.3, respectively. MILP Master Problem stands for the linearized version of the original MINLP problem and in this solution setting, the training problem and the MILP Master problem are solved iteratively until the optimal values of both problems approach close to each other. Convergence is assured by automatically including integer cuts to the training problem, which stands for the optimal selection of the features or inputs, represented by the feature selection vector as mentioned before. As opposed to selecting the features randomly and sequentially, the addition of the integer cuts ensures the selection of the best features while training the ANN.

3. RESULTS

This section compares the training and the test performance of ANNs for all inputs and selected inputs obtained from the proposed optimization problem. The application includes three commonly used datasets. All datasets are publicly available classification benchmarks but in addition to that, the first case study also justifies the use of machine learning techniques for medical applications which is a relatively new area. The second application is also associated with chemical engineering and biotechnology, which is again a unique and interesting application area for engineering and the last dataset is related to heart failure detection.

The performance criterion is the confusion matrix for the training and the test data. 50% training ratio is used for two cases after shuffling the data randomly. Traditional fully connected ANN (FC-ANN) which utilizes all the available inputs, without any input selection algorithm, is the first architecture for performance evaluation. Secondly, SIS-ANN (Sequential Input Selection based ANN) results are presented in which ANN is trained using selected inputs from sequential input selection algorithm. Finally, MIP-ANN (Mixed Integer Programming based ANN) results, which demonstrate the performance obtained the mixed-integer formulation in Eq. 3, is presented. All architectures use hyperbolic tangent activation functions in two hidden layer neurons.

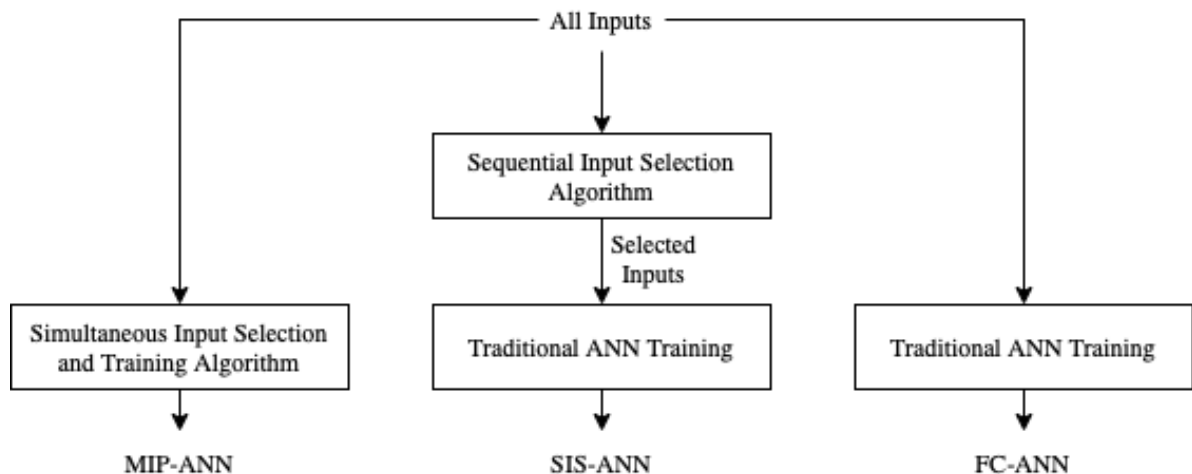


Figure 2: Different ANN methodologies which are used for comparison

3.1. Breast Cancer Dataset

The breast cancer dataset is a popular classification benchmark which found significant attention from the literature (Agarap 2018; Benbrahim, Hachimi, and Amine 2019; Lavanya and Rani 2011). The dataset contains mean, standard deviation and worst values for 10 different structural properties to diagnose a patient as cancer or not. The problem requires the measurement of high number of input variables once the input reduction is not applied. On the other hand, the determination of an optimal subset is a

challenging task with high number of combinations, hindering the use of trial and error procedures. Table 1 provides the available inputs from which dark market entries are selected based on the corresponding algorithm. Note that, FC-ANN inputs are not included in Table 1 since all of them are used for the method. In this case, a significant input reduction is required from the algorithms to observe the theoretical contributions more clearly. Both sequential input selection and mixed-integer based approach focuses on the worst values of particular inputs for diagnosis. Unlike sequential input selection algorithm, which uses perimeter and symmetry for the decision making, mixed-integer formulation uses radius and concavity to calculate the cancer status.

Table 1. Selected inputs for Case 1

		radius	texture	perimeter	area	smoothness	compactness	concavity	concave points	symmetry	fractal dimension
SIS-ANN	Mean										
	Std										
	Worst										
MIP-ANN	Mean										
	Std										
	Worst										

Table 2 includes the training and the test performances for FC-ANN, SIS-ANN and MIP-ANN. The former delivers the best training performance, thanks to high number of weights in the ANN architecture. However, a significant test performance drop is obtained for the FC-ANN architecture, which is not desired in many cases and considered a measure of overfitting. SIS-ANN delivers a reduced test performance compared to FC-ANN using two inputs shown in Table 1. However, overfitting is decreased, as well, since a perfect classification is not observed in the training.

Table 2. Classification comparison of different ANN approaches for Case 1

		FC-ANN		SIS-ANN		MIP -ANN	
		C ₁	C ₂	C ₁	C ₂	C ₁	C ₂
Train	C ₁	109	0	103	6	97	12
	C ₂	0	175	4	171	0	175
	Accuracy	1.000		0.965		0.957	
Test	C ₁	94	9	89	14	84	19
	C ₂	10	172	13	169	1	181
	Accuracy	0.933		0.905		0.930	

MIP-ANN delivers a similar test performance, compared to FC-ANN, with a convenient training performance. Such similarity is an indication of eliminated overfitting. In addition, despite poor performance compared to both FC-ANN and SIS-ANN in the training data, MIP-ANN outperforms in test. Such a performance is possible due to tailored formulation in Eq. 3, which accounts for the ANN architecture and the impact of the inputs simultaneously during the ANN development. As a major practical advantage, only two measurements for real-time applications would deliver a satisfactory performance besides its computational advantages, when a new prediction or model update is required.

3.2. Wine Dataset

Wine dataset contains 178 samples of 13 inputs which are used for the prediction of 3 classes. The dataset has found significant applications in the literature (Bredensteiner and Bennett 1999; Zhong and Fukushima 2007). The available and selected inputs are presented in Table 3.

Table 3. Selected inputs for Case 2

	alcohol	malic_acid	ash	lcalinity_of_ash	magnesium	total_phenols	flavanoids	nonflavanoid_phenols	proanthocyanins	color_intensity	hue	od280/od315_of_diluted_wines	proline
SIS-ANN													
MIP -ANN													

Four input samples out of 13 were selected using sequential input selection and mixed- integer based selection algorithm. The last input is selected by both algorithms; however, other selected inputs are different for the two approaches.

Table 4 includes the performances of FC-ANN, SIS-ANN and MIP-ANN based on the confusion matrices.

Table 4. Classification comparison of different ANN approaches for Case 2

		FC-ANN			SIS-ANN			MIP -ANN		
		C ₁	C ₂	C ₃	C ₁	C ₂	C ₃	C ₁	C ₂	C ₃
Train	C ₁	26	0	0	26	0	0	24	2	0
	C ₂	0	37	0	0	37	0	2	35	0
	C ₃	0	0	26	0	0	26	0	0	26
	Accuracy	1.000			1.000			0.955		
Test	C ₁	32	1	0	32	1	0	32	1	0
	C ₂	7	26	1	3	31	0	1	32	1
	C ₃	0	1	21	3	3	16	0	0	22
	Accuracy	0.887			0.887			0.966		

FC-ANN and SIS-ANN have similar training and test performances, despite different samples are misclassified in the test. Both ANN architectures have a similar performance drop based on their training and test accuracies. The performance drop in the FC-ANN clearly stems from the overfitting problem since all the available information is already present in the training. However, SIS-ANN suffers from the selection of an inefficient input subset. MIP-ANN delivers a similar training and test performance. In addition, the latter is the superior among three ANN architectures.

3.3. Heart Failure Clinical Records Dataset

Heart failure clinical records dataset (Chicco and Jurman 2020) includes 299 measurements, which enable the prediction of death event under follow-up period based on 12 important and potential indicators of current health status of a human. Unlike other cases, in order to show the superiority of the proposed methodology under relatively small training ratio, only 10% randomly selected data of the data set is used for the training. Such a small training ratio is also useful to demonstrate the generalization capability of the method, which is an important and highly-encountered concern when data are limited or measurements are challenging. Table 5 shows the selected inputs based on the methods.

Table 5. Selected inputs for Case 3

	age	anemia	high blood pressure	creatinine phosphokinase	diabetes	ejection fraction	platelets	sex	serum creatinine	serum sodium	smoking	time
SIS-ANN												
MIP -ANN												

The impact of the input selection is observed on the prediction performance both from the point selection of actual indicator, which drives or leads the complex and highly-nonlinear nature of the existing interactions in the human body, and the reduction in overfitting thanks to eliminated connections from the particular inputs to the hidden layer. The impact of the overfitting is observed on FC-ANN, which suffers from significant performance difference in training and test despite all inputs are available in the training set. On the other hand, SIS-ANN, although significant amount of connections and related weights are removed from the ANN structure due to feature selection, delivers a relatively-low prediction accuracy since a better input selection could not be performed with a simple input selection algorithm without considering the architecture of the ANN formulation explicitly.

Table 6. Classification comparison of different ANN approaches for Case 3

		FC-ANN		SIS-ANN		MIP -ANN	
		C ₁	C ₂	C ₁	C ₂	C ₁	C ₂
Train	C ₁	17	0	14	3	17	0
	C ₂	0	12	3	9	5	7
	Accuracy	1.000		0.793		0.827	
Test	C ₁	133	53	132	54	174	12
	C ₂	32	52	31	53	55	29
	Accuracy	0.685		0.685		0.751	

4. CONCLUSION

ANNs are empirical models with high number of tuning parameters. They have flexible structure which requires the pre-specification of inputs, neuron number, activation functions, training algorithm, training data selection and many other issues with high theoretical complexity. In addition, the approach to deal with such issues are usually data and case dependent; thus generalization of ANN design and training methods is a challenging task. A major and commonly encountered issue is overfitting, which is caused by the selection of high number of inputs and hidden neuron number in addition to lack of statistically meaningful dataset.

This study focuses on the selection of the optimal inputs through an MINLP formulation and does not explicitly address other aforementioned considerations during training of the ANN development. The impact of the proposed approach is implemented on three publicly available and widely used datasets, showing the contribution of the approach. The method delivers statistically sufficient and meaningful

input subset, resulting in a desired training performance and good prediction performance despite significant reduction in total number of inputs. This has several advantages over the traditional trial and error based and sequential approaches. Once the number of features (or inputs) is decreased, the ANN number of parameters for training also decreases together with the training computational load without causing underfitting. In addition, model update when a new measurement becomes available gets faster. Once those ANNs are implemented on actual implementations with real-time prediction, a smaller input space would enable a more robust functionality over ANNs considering all inputs. At the same time, please note that some inputs obtained from the sensors are exposed to failures in daily operation.

A particular input might be eliminated from input space both due to its correlation with other inputs and its irrelevance to the output. The former consideration may show the multiplicity in ANNs which is beyond the scope of this paper. In practice there are many less-dependent input subset combinations among a dependent input set. Here, the optimization algorithm has a major role over the subset selection among the correlated inputs. The solution of MINLPs is usually computationally expensive task for larger networks and datasets.

Many other hyper-parameter related performance influencing architectural decisions exist in the ANN formulation. Activation function selection, number of hidden neurons, optimization algorithm tuning parameters, training ratio, scaling of the data and initialization of the optimization are only some of those. Thus, a more comprehensive and ultimate comparison is out of the scope of the paper and limited to the input selection only.

Our future works include the development of reformulations, which decompose the problem into smaller and easier-to-solve problems for handling large datasets.

5. ACKNOWLEDGEMENT

This publication has been produced benefiting from the 2232 International Fellowship for Outstanding Researchers Program of TUBITAK (Project No: 118C245). However, the entire responsibility of the publication belongs to the owner of the publication.

REFERENCES

- Agarap, Abien Fred M. 2018. "On Breast Cancer Detection: An Application of Machine Learning Algorithms on the Wisconsin Diagnostic Dataset." In *Proceedings of the 2nd International Conference on Machine Learning and Soft Computing*, 5–9.
- Aha, David W, and Richard L Bankert. 1996. "A Comparative Evaluation of Sequential Feature Selection Algorithms." In *Learning from Data*, Springer, 199–206.
- Akdag, Unal, M. Aydin Komur, and A. Feridun Ozcug. 2009. "Estimation of Heat Transfer in Oscillating Annular Flow Using Artificial Neural Networks." *Advances in Engineering Software* 40(9): 864–70.
- Alom, Md Zahangir et al. 2019. "A State-of-the-Art Survey on Deep Learning Theory and Architectures." *Electronics (Switzerland)* 8(3): 292.
- Azadeh, A., S. F. Ghaderi, and S. Sohrabkhani. 2008. "Annual Electricity Consumption Forecasting by Neural Network in High Energy Consuming Industrial Sectors." *Energy Conversion and Management* 49(8): 2272–78.
- Benbrahim, Houssam, Hanaâ Hachimi, and Aouatif Amine. 2019. "Comparative Study of Machine Learning Algorithms Using the Breast Cancer Dataset." In *International Conference on Advanced Intelligent Systems for Sustainable Development*, Springer, 83–91.
- Bredensteiner, Erin J., and Kristin P. Bennett. 1999. "Multicategory Classification by Support Vector Machines." *Computational Optimization and Applications* 12(1–3): 53–79.
- Castellano, Giovanna, and Anna Maria Fanelli. 2000. "Variable Selection Using Neural-Network Models." *Neurocomputing* 31(1–4): 1–13.
- Chicco, Davide, and Giuseppe Jurman. 2020. "Machine Learning Can Predict Survival of Patients with Heart Failure from Serum Creatinine and Ejection Fraction Alone." *BMC medical informatics and*

- decision making* 20(1): 1–16.
- Diaz, G I, A Fokoue-Nkoutche, G Nannicini, and H Samulowitz. 2017. "An Effective Algorithm for Hyperparameter Optimization of Neural Networks." *IBM Journal of Research and Development* 61(4/5): 9:1-9:11.
- Duran, Marco A., and Ignacio E. Grossmann. 1986. "An Outer-Approximation Algorithm for a Class of Mixed-Integer Nonlinear Programs." *Mathematical Programming* 36(3): 307–39.
- Ferri, Francesc J, Pavel Pudil, Mohamad Hatef, and Josef Kittler. 1994. "Comparative Study of Techniques for Large-Scale Feature Selection." In *Machine Intelligence and Pattern Recognition*, Elsevier, 403–13.
- Feurer, Matthias, and Frank Hutter. 2019. "Hyperparameter Optimization." In *Automated Machine Learning*, Springer, Cham, 3–33.
- Hart, William E., Jean Paul Watson, and David L. Woodruff. 2011. "Pyomo: Modeling and Solving Mathematical Programs in Python." *Mathematical Programming Computation* 3(3): 219–60.
- Kocak, Habip, and Turgut Un. 2014. "Forecasting the Gold Returns with Artificial Neural Network and Time Series." *International Business Research* 7(11).
- Kocis, Gary R, and Ignacio E Grossmann. 1989. "Computational Experience with DICOPT Solving MINLP Problems in Process Systems Engineering." *Computers & Chemical Engineering* 13(3): 307–15.
- Kronqvist, Jan, David E Bernal, Andreas Lundell, and Ignacio E Grossmann. 2019. "A Review and Comparison of Solvers for Convex MINLP." *Optimization and Engineering* 20(2): 397–455.
- Lavanya, D, and Dr K Usha Rani. 2011. "Analysis of Feature Selection with Classification: Breast Cancer Datasets." *Indian Journal of Computer Science and Engineering (IJCSE)* 2(5): 756–63.
- Leahy, Paul, Ger Kiely, and Gearóid Corcoran. 2008. "Structural Optimisation and Input Selection of an Artificial Neural Network for River Level Prediction." *Journal of Hydrology* 355(1–4): 192–201.
- Ledesma, Sergio et al. 2008. "Feature Selection Using Artificial Neural Networks." In *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 351–59.
- Manngård, Mikael, Jan Kronqvist, and Jari M Böling. 2018. "Structural Learning in Artificial Neural Networks Using Sparse Optimization." *Neurocomputing* 272: 660–67.
- Mutlu, Ali Yener, and Ozgun Yucel. 2018. "An Artificial Intelligence Based Approach to Predicting Syngas Composition for Downdraft Biomass Gasification." *Energy* 165: 895–901.
- Poernomo, Alvin, and Dae-Ki Kang. 2018. "Biased Dropout and Crossmap Dropout: Learning towards Effective Dropout Regularization in Convolutional Neural Network." *Neural Networks* 104: 60–67. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0893608018301096>.
- Rückstieß, Thomas, Christian Osendorfer, and Patrick van der Smagt. 2011. "Sequential Feature Selection for Classification." In *Australasian Joint Conference on Artificial Intelligence*, Springer, 132–41.
- Sahinidis, Nikolaos V. 1996. "BARON: A General Purpose Global Optimization Software Package." *Journal of Global Optimization* 8(2): 201–5.
- Schittkowski, K. 2007. "Experimental Design Tools for Ordinary and Algebraic Differential Equations." In *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 9137–47.
- Sildir, Hasan, Erdal Aydin, and Taskin Kavzoglu. 2020. "Design of Feedforward Neural Networks in the Classification of Hyperspectral Imagery Using Superstructural Optimization." *Remote Sensing* 12(6). <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/6/956>.
- Stamoulis, Dimitrios, Ermao Cai, Da-Cheng Juan, and Diana Marculescu. 2018. "Hyperpower: Power- and Memory-Constrained Hyper-Parameter Optimization for Neural Networks." In *2018 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*, IEEE, 19–24.
- Verikas, A., and M. Bacauskiene. 2002. "Feature Selection with Neural Networks." *Pattern Recognition Letters* 23(11): 1323–35.
- Van De Wal, Marc, and Bram De Jager. *A Review of Methods for Input/Output Selection*.
- Yetilmezsoy, Kaan, Bestamin Ozkaya, and Mehmet Cakmakci. 2011. "Artificial Intelligence-Based

Prediction Models for Environmental Engineering." *Neural Network World* 21(3): 193–218.
Zhong, Ping, and Masao Fukushima. 2007. "Regularized Nonsmooth Newton Method for Multi-Class
Support Vector Machines." In *Optimization Methods and Software*, 225–36.



THE POSSIBLE THERAPEUTIC IMPACTS OF PHOTOBİOMODULATION AND LOW-DOSE PHOTODYNAMIC THERAPY ON HUVECS TOWARDS ANGIOGENESIS: A COMPARATIVE IN VITRO ANALYSIS

¹Dilara PORTAKAL KOÇ , ²Günnur PULAT , ³Nermin TOPALOĞLU 

^{1,2}Izmir Katip Celebi University, Department of Biomedical Technologies, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Izmir, TURKIYE

³Izmir Katip Celebi University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Biomedical Engineering, Izmir, TURKIYE

¹dilara@live.de, ²gunnur.onak@ikcu.edu.tr, ³nermin.topaloglu@ikcu.edu.tr

Geliş/Received: 15.04.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 09.08.2022

ABSTRACT: Photobiomodulation (PBM) is a non-ionizing therapy that promotes faster wound healing and cell proliferation/differentiation. It is recently understood that photodynamic therapy (PDT) may act as PBM when applied at low-level. In this study, a comparative analysis between PBM and low-dose PDT was performed on HUVECs to increase angiogenesis. HUVECs were irradiated at 808-nm of wavelength. Indocyanine green was used as a photosensitizer in PDT applications. Single and triple treatments were employed for both modalities. Their effects were analyzed with cell viability, intracellular ROS, MMP change, NO release, and morphological analysis. The expressions of vascularization-related proteins (VEGF, PECAM-1, and vWf) were determined through immunofluorescence staining and qRT-PCR. Temperature changes during applications were monitored to determine any thermal damages. It was observed that triple PDT application was more successful at increasing cell proliferation and tube-like structure formation with a 20% rate. The level of ROS did not significantly change in all applications. However, the amount of NO release in triple PDT application was nearly 5 times that of the control group, which showed it acted as a key molecule. The vascularization-related proteins were more strongly expressed in PDT applications. It was understood that low-dose PDT can exert a photobiomodulation effect to accelerate vascularization through NO release.

Keywords: Photobiomodulation, Photodynamic therapy, 808-nm, Indocyanine green, HUVECs

Fotobiyomodülasyon ve Düşük Doz Fotodinamik Terapinin HUVEC Hücrelerindeki Anjiyogenez'e Yönelik Olası Terapötik Etkileri: Karşılaştırmalı İn Vitro Analiz

ÖZ: Fotobiyomodülasyon (FBM), yara iyileşmesi, hücre proliferasyonu/farklılaşması mekanizmalarını hızlandıran iyonlaştırıcı olmayan bir ışık terapisi. Son zamanlarda, fotodinamik terapinin (FDT) düşük dozlarda uygulandığında FBM gibi davranabileceği anlaşılmıştır. Bu çalışmada karşılaştırmalı bir analizle anjiyogenez artırma için HUVEC'ler üzerinde FBM ve düşük doz FDT'nin etkisi araştırılmıştır. HUVEC'ler 808 nm dalgaboyu ile uyarılmıştır. FDT uygulamalarında fotosensitizan olarak indosiyanın yeşil kullanılmıştır. Her iki yöntem tekli ve üçlü olarak uygulanmıştır. Uygulamaların etkileri hücre canlılığı, hücre içi ROS, MMP değişikliği, NO salınımı ve morfolojik analizler ile incelenmiştir. Vaskülarizasyonla ilgili proteinlerin (VEGF, PECAM-1 ve vWf) ifadeleri, immünofloresan boyama ve qRT-PCR yöntemleri ile belirlenmiştir. Olası termal hasarları belirlemek için ışık uygulamaları sırasındaki sıcaklık değişimleri izlenmiştir. Sonucunda, üçlü düşük doz FDT uygulamasının hücre proliferasyonu ve damar benzeri yapı oluşumunda %20 oranında daha başarılı olduğu gözlenmiştir. Bütün uygulamalarda ROS seviyesi önemli ölçüde değişmezken, üçlü FDT uygulamalarında NO salınımının miktarı kontrol grubunun yaklaşık 5 katı olmuş, bu da NO salınımının bu mekanizmada anahtar bir molekül olarak

hareket ettiğini göstermiştir. Vaskülarizasyonla ilgili proteinler de FDT uygulamalarında daha güçlü bir şekilde ifade edilmiştir. Sonuç olarak, düşük doz FDT'nin NO salınımı yoluyla vaskülarizasyonu hızlandırmak için fotobiyomodülatif etki gösterdiği anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Fotobiyomodülasyon, Fotodinamik terapi, 808-nm, İndosiyanın yeşil, HUVEC hücreleri

1. INTRODUCTION

Light therapies are important strategies to combat cancerous and non-cancerous diseases and also to accelerate healing processes recently. Specifically, photodynamic therapy (PDT) is used to destroy cancer or bacterial cells and photobiomodulation (PBM) is used to enhance cell proliferation/differentiation, wound healing, and pain relief [Topaloglu and Bakay, 2022; Topaloglu *et al.*, 2021a; Topaloglu *et al.*, 2021b]. PBM is a non-ionizing and non-thermal light application that triggers some biochemical reactions inside the cells via mitochondria at visible and near-infrared wavelengths [Amaroli *et al.*, 2019; de Freitas and Hamblin, 2016; Huang, 2009]. After the absorption of the low-level visible or near-infrared light by the target tissue, numerous biological functions are enhanced without causing any harm to the target [Hamblin, 2018]. The biological functions are associated with intracellular reactive oxygen species (ROS) production, adenosine triphosphate (ATP) generation, nitric oxide (NO) release, DNA synthesis, etc. [Hawkins *et al.*, 2005]. Cytochrome c oxidase (COX) is an important part of the electron transport chain in mitochondria [Hough *et al.*, 2014] and acts as a chromophore for visible and near-infrared light during PBM applications which results in a protein gradient across the cell and mitochondrial membrane [Zorov *et al.*, 2014]. This process causes an increase in mitochondrial membrane potential (MMP) change followed by ATP synthesis, intracellular ROS generation, and nitric oxide (NO) release [Hamblin, 2018]. Released NO molecules and produced intracellular ROS are key molecules that mediate the mechanism of PBM and serve as signaling molecules to influence many physiological pathways that will end up with the therapeutic outcome of PBM [Zhang *et al.*, 2016; Mittal *et al.*, 2014]. COX is inhibited by NO molecules. When it is released from COX after light absorption, it will influence the respiration rate in the cells. This is the reason why ATP synthesis increases and other therapeutic outcomes such as cell proliferation/differentiation can be obtained in the cells treated with PBM [Beltrán *et al.*, 2000; Karu *et al.*, 2005; Borutaite *et al.*, 2000].

PDT is also a therapeutic light application that is generally used to destroy pathogens or cancer cells in the presence of a photosensitizer. Visible or near-infrared light is applied to excite the photosensitizer and a chain of transfer reactions occurs to produce a high concentration of ROS that will exhibit photocytotoxicity on unwanted cells [Castano *et al.*, 2004]. The quantum oxygen yield of a photosensitizer upon irradiation will determine the efficacy of PDT. Higher ROS yield will determine the degree of the killing effect of PDT. Lower ROS yield may not exhibit cytotoxicity and may even induce cell survival mechanisms in the cells [Topaloglu *et al.*, 2016]. PDT which was used at low doses induced cell proliferation and VEGF expression in nude mice brains in a previous study [Zhang *et al.*, 2005]. Thus, it was understood that the optimization of the light parameters in these light applications is very important to obtain the desired outcome of the applications and PDT at a low level may be used to enhance cell proliferation/differentiation and wound healing [Topaloglu *et al.*, 2016; Topaloglu *et al.*, 2015]. This information has opened new perspectives to the use of PDT for different strategies, instead of antibacterial or anticancer purposes. The biphasic dose-response of the cells towards PDT can be utilized and the potential of PDT to produce ROS in a controllable way can be an advantageous tool to induce cell proliferation/differentiation, wound healing, etc [Topaloglu and Bakay, 2022]. In PBM, the chromophore is the COX in mitochondria and its prevalence may determine its effectiveness [Topaloglu *et al.*, 2021a]. In PDT, photosensitizers act as a chromophore which is administered exogenously. Thus, its concentration can be easily adjusted depending on the application type and desired outcome [Topaloglu and Bakay, 2022].

Recently, there have been several studies that used PDT as a stimulative tool. Bolukbasi Ates and their colleagues used 809-nm of wavelength in the presence of indocyanine green (ICG) to enhance the

osteogenic differentiation at low energy densities and ICG concentrations [Ateş *et al.*, 2018]. Topaloglu and Bakay used chlorin e6 (Ce6) and red light to enhance neural cell differentiation, again at low-level light parameters and photosensitizer concentration [Topaloglu and Bakay, 2022]. Another study that was performed on scratched wounds of fibroblasts showed that 660-nm of wavelength in the presence of 5-ALA induces faster wound healing [Sibata *et al.*, 2000]. In light of these studies, it was understood that low-dose PDT may serve a stimulative effect and may become more successful than PBM by choosing the appropriate parameters more properly.

Endothelial cells have diverse functions and perform many important duties in the body. Mainly, they are responsible for the repair of the biological tissue and new blood vessel formation depending on their large capacity to divide, migrate, and differentiate for building vessels through angiogenesis. Human umbilical vein endothelial cells (HUVEC) are obtained from the vessel of the umbilical cord and are good sources to study the behavior of the endothelial cells [Terena *et al.*, 2021]. It is also very valuable to analyze the photobiomodulation effect of light on these cells to reveal their potential for angiogenesis upon irradiation. Thus, the comparative analysis of PBM and low-dose PDT was performed on HUVECs in this study. Besides, the potential of 808-nm of wavelength was analyzed in PBM and low-dose PDT because of the deep penetration capacity of NIR light into the biological tissue. The most appropriate photosensitizer that strongly absorbs the wavelengths around 800-nm is ICG [Topaloglu *et al.*, 2015]. That's why ICG was used in low-dose PDT applications to compare its stimulative potential with PBM. To determine the effect of the PBM and low-dose PDT on HUVECs, cell viability, intracellular ROS, MMP change, NO release, and morphological analysis of HUVECs were performed. Besides, the expressions of important vascularization-related proteins were determined through immunofluorescence staining and qRT-PCR. Finally, the temperature change was monitored with a thermal camera to understand whether there was a thermal effect of NIR light irradiation on the cells.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Light Source

In this study, an 808-nm diode laser (Teknofil, Istanbul, Turkey) was used as a light source with a maximum output power of 2 Watts. The optical fiber of the laser device was positioned vertically and the fiber tip was 10 cm distant from the cell culture plates on an optical table. The illumination area was adjusted to irradiate a definite area homogeneously on the cell culture plates. The output power was set to 600 mW and 1 J/cm² energy density was applied whether the application was PBM or low-dose PDT with an exposure duration of 5 seconds.

2.2 Cell Culture

Human umbilical vein endothelial cells (HUVECs) were kindly provided from the Animal Cell Culture and Tissue Engineering Laboratory, Ege University and cultured in a humidified atmosphere with 5% CO₂ at 37°C in Dulbecco's Modified Eagle's Medium (DMEM, Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA) containing 5% fetal bovine serum (FBS, Gibco, Dublin, Ireland), 1% L-glutamine (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA) and 1% penicillin. After they reached 90% confluency, they were trypsinized to dissociate them from the flask, and then transferred to the wells of a 96-well plate where the cells received light irradiation. For PDT applications, 1x10⁵ cells were seeded in a single well of the 96-well plate to prevent a significant amount of cell loss during the multiple washing steps after ICG incubation. For PBM applications, 1x10⁴ cells were seeded in a single well of the 96-well plate. They were cultured for 24 hours at 37 °C before light applications.

2.3 Photosensitizer

For low-dose PDT applications, ICG was used as a photosensitizer because of its strong absorption band at around 800 nm of wavelength. 1.93 mg of ICG (Santa Cruz, Dallas, Texas, USA) was dissolved in 500 μ L DMEM to prepare a stock solution with a concentration of 5 mM. Then it was diluted with DMEM to the concentrations of 0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2.5, and 5 μ M to be used in the analyses.

2.4 Cytotoxicity of the Photosensitizer on HUVECs

Seven different concentrations of ICG (0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2.5, and 5 μ M) were prepared in serum-free medium (DMEM) in the dark, incubated with HUVECs for 1 hour to observe the possible toxic effect of the photosensitizer on the cells, and finally to determine the ideal concentration for the low-dose PDT applications. After the incubation, the cells were washed once with phosphate-buffered saline (PBS, Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA) and endothelial cell growth medium (EGM, Lonza, Basel, Switzerland) was added. After 24h, cell viability analysis was performed by 2, 5-diphenyl tetrazolium bromide (MTT, Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA) measuring the absorbance with a microplate reader at 570 nm (Multimode Microplate Reader Biotek Synergy HTX, Biotek, Winooski, VT, USA).

2.5 Experimental Procedures of PBM and Low-Dose PDT

The effect of light applications in PBM and low-dose PDT therapies was investigated with two different modalities: single and triple light treatments. In the single light treatment modality, the cells were irradiated only once throughout the experiments. In the triple light treatment modality, the cells received daily irradiation with a time interval of 24 hours three times. Before the light irradiations, the cells were incubated with 0.1 μ M ICG for 1 hour in low-dose PDT groups. When the incubation with ICG was completed, the cells were washed with PBS twice and then EGM was added to them. In the meantime, the cells in PBM groups were not incubated with ICG, only their medium was refreshed and EGM was added. Before laser applications, the optical table and the laser device were sterilized for 30 min under UV light. Then, the cells were irradiated by an 808-nm diode laser at 1 J/cm² energy density. To perform a triple light treatment, this application was repeated three times at 24-hour intervals. Besides the control group which did not receive any application, the ICG group was formed to investigate the effect of only ICG application on HUVECs and angiogenesis. The cells in this group were incubated with 0.1 μ M ICG and were not irradiated with light. Similar to the light applications, ICG applications were performed as single and triple treatments. A set of cells in this group was incubated with ICG once and they were followed up for 7 days. The other set of cells in this group was incubated with ICG three times with a time interval of 24 hours and they were followed up for 7 days, too. The medium of HUVEC cells was refreshed with EGM every day.

2.6 Morphological Analysis of HUVECs

The morphology of HUVECs was evaluated microscopically throughout the experimental procedure on days 1, 2, 3, 4, and 7. An inverted microscope (Olympus CKX41, Olympus Co. Ltd., Tokyo, Japan) was used to capture microscopic images of the cells. For each sample at least 10 images were obtained with 20X magnification. When the tubular structures were formed during the follow-up period until day 7, the total length of these structures was measured by using 3 randomly selected microscopic images and analyzing them with the help of an "Angiogenesis Analyzer" plugin in ImageJ software (NIH, Bethesda, MD, USA) as described previously [Carpentier *et al.*, 2020; Onak Pulat *et al.*, 2021]. The obtained data of the experimental groups were normalized with the data of the control group and the change in the length of the tubular structures was represented as a percentage.

2.7 Cell Viability

At the end of the experimental procedures, the viability of HUVECs was analyzed by 3-(4,5-dimethylthiazol-2-yl)-2,5-diphenyl tetrazolium bromide (MTT) on day 7. First, a 5 mg/ml stock solution was prepared. Then 10% of MTT solution and 90% of DMEM without serum were added to the cells. After 2 h of incubation, MTT solution was removed and 100 μ L of Dimethyl Sulfoxide (DMSO) solution (Merck, Darmstadt, Germany) was added to the cells. After 30 minutes of incubation with DMSO, the absorbance values of the samples were measured at 570 nm with the microplate reader. Finally, the data obtained in this analysis were normalized with the data of the control group and the average percentages of the cell viabilities were calculated.

2.8 Intracellular ROS Generation

Light therapies such as PBM or PDT induce ROS production intracellularly and these molecules play a key role to provoke specific cellular functions inside the cells after these applications. For this, the amount of intracellular ROS production was analyzed by using a non-fluorescent probe of 2',7'-dichlorofluorescein diacetate (DCFH-DA, Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA) after light treatments. The available ROS molecules convert DCFH-DA into a fluorescent molecule of dichlorofluorescein (DCF). Before the light applications, the cells were incubated with 0.01 mM of DCFH-DA for 45 minutes. Afterward, the cells were washed twice with PBS and then the experimental procedures of PBM or PDT were applied. At the end of the applications, the fluorescence intensity of DCF was measured using the microplate reader directly with an excitation wavelength of 485/20 nm and an emission wavelength of 535/20 nm to determine the level of intracellular ROS production. The data obtained in each group were normalized with the data of the control group and the average percentages of the ROS levels were calculated.

2.9 NO Release

Light therapies, especially PBM, induce the release of NO molecules bound to mitochondria. For this, Griess reagent (Biotium, Fremont, CA, USA) was used to assess the amount of NO released. Griess reagent contains sulfanilic acid and N-(1-naphthyl)ethylenediamine and they react with nitrite, the breakdown product of NO. At the end of this reaction, a dye molecule is formed that can be measured spectrophotometrically. 24 hours after the light applications, an identical volume of Griess reagent and the supernatant solution from each sample were mixed and incubated for 30 minutes at room temperature. The absorbance values of each sample were measured using the microplate reader at a wavelength of 548 nm after each light application. The amount of nitrite in each sample was calculated using the standard curve formula as an indicator for the NO molecules released after the applications.

2.10 Mitochondrial Membrane Potential (MMP) Change

The changes in the MMP of the cells treated with light applications were determined by the JC-1 Mitochondrial Membrane Potential assay (Abcam, Cambridge, UK). The cells were rinsed with dilution buffer and then incubated with 0.01 mM of JC-1 solution for 10 minutes at 37°C before the light applications. Then the cells were washed twice with the dilution buffer and the appropriate application protocols were carried out in each PBM and PDT group. The fluorescent signals were read instantly at an excitation wavelength of 475 nm and the emission wavelengths of 595 nm and 535 nm with a microplate Reader (CLARIOstar Microplate Reader BMG LABTECH, Germany). Besides, the red signals of the live cells in each experimental group were captured with 20X magnification by using a fluorescent microscope (Olympus CKX41, Olympus Co. Ltd., Tokyo, Japan). CellSens Imaging Software was used to obtain these images where the red fluorescence represented the hyperpolarization of the live cells.

2.11 Immunofluorescence Staining

For the analysis of the angiogenesis induced by light therapies in HUVECs, immunofluorescence staining was performed for the angiogenesis-related proteins of vascular endothelial growth factor (VEGF), Platelet Endothelial Cell Adhesion Molecule-1 (PECAM-1), and von Willebrand factor (vWf). At the end of the 7-day follow-up, HUVECs were washed twice with PBS and then fixed with 4% paraformaldehyde (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA) at 4°C for 30 minutes. Afterward, samples were immersed with 0.1% Triton X-100 in PBS for 1 hour and blocked with 1.5% Bovine Serum Albumin (BSA) in PBS for 2 hours. The samples were then incubated with primary antibodies in PBS containing 1% BSA overnight at 4°C. Primary antibodies were VEGF (1:50, cat. no. sc-53462, Santa Cruz Biotechnology Inc., Santa Cruz, California, USA), PECAM-1 (1:50, cat. no. sc-376764, Santa Cruz Biotechnology Inc., Santa Cruz, California, USA) and vWf (1:50, cat. no. sc-365712, Santa Cruz Biotechnology Inc., Santa Cruz, California, USA). The fluorescent secondary antibody was m-IgGκ BP-PE (1:50, cat. no. sc-516141, Santa Cruz Biotechnology Inc., Santa Cruz, California, USA) and it was diluted with 1% BSA before use. Each sample was also stained with 4,6-diamidino-2-phenylindole (DAPI) to image the cell nuclei. Using the inverted fluorescent microscope (Olympus CKX41, Tokyo, Japan), the immunofluorescent images of the expression patterns of VEGF, PECAM-1, and vWF proteins were captured with the same exposure time and light intensity.

2.12 Relative Expressions of vWf and PECAM-1 gene

On day 7 after all light irradiations were completed, the relative expressions of vWf and PECAM-1 gene were assessed with quantitative real-time PCR analysis. First, total RNA in the cells was isolated for each group using a total RNA purification kit (GeneAll Biotechnology, Co., Ltd., Seoul, Korea). Afterward, the conversion of the extracted/purified RNA to cDNA was performed using the HiScript III 1st Strand cDNA Synthesis Kit (Vazyme Biotech Co., Ltd, Nanjing, China). Finally, qRT-PCR analysis was performed with the obtained cDNAs by using the forward and reverse gene-specific primers. Glyceraldehyde 3-phosphate dehydrogenase (GAPDH) was used as a housekeeping gene. StepOne Plus Real-Time PCR System (Applied Biosystems, Foster City, USA) was used for the qRT-PCR process. The expression levels of each gene were analyzed according to the expression level of GAPDH with StepOne Software v2.3. The forward primer of GAPDH was GAAATCCCATCACCATCTTCC and the reverse primer of GAPDH was CCAGCATCGCCCCACTT, the forward primer of vWf was CCCATTTGCTGAGCCTTGT and the reverse primer of vWf was GGATGACCACCGCCTTTG, the forward primer of PECAM-1 was GCTGACCCCTTCTGCTCTGTT and the reverse primer of PECAM-1 was TGAGAGGTGGTCTGACATC (Oligomer, Ankara, Turkey).

2.13 Temperature Monitoring

During light therapies, the applied light energy may be converted into heat energy which may result in significant temperature increase and irreversible damage. Especially applications in the infrared regime and the presence of a photosensitizer are more prone to this outcome. For this, the temperature change was monitored with a thermal camera (Testo, Thermal imager). The measurements were performed during all light applications. The temperature was measured at the beginning and immediately at the endpoint of the light irradiation. The changes in temperatures were calculated.

2.14 Statistical Analysis

Each application was performed with at least three samples and repeated three times. The data obtained were first evaluated by one-way ANOVA. Then it was followed by Tukey's post hoc test using GraphPad Prism Version 9.0.1 software (GraphPad Software Inc., La Jolla, CA, USA). The *p* values less than 0.05 were considered statistically significant.

3. RESULTS

3.1 Cytotoxicity of ICG on HUVECs

Figure 1 shows the cell viability of HUVECs after 24 hours of incubation with different ICG concentrations. It was observed that ICG alone did not show any significant toxic effect. There was a slight decrease observed with the concentrations of 0.05, 0.1, 0.5, 1, and 2.5 μM . The concentrations of 0.25 and 5 μM ICG induced an increase in cell viability. However, there were no statistically significant differences between any experimental data and the control group (Figure 1). For low-dose PDT applications, 0.1 μM ICG was chosen because of being the possible lowest concentration which was capable to produce enough ROS for PBM, but not too much to kill the cells. The higher concentrations than 0.1 μM ICG may induce significant ROS production in the presence of light irradiation at 808-nm wavelength.

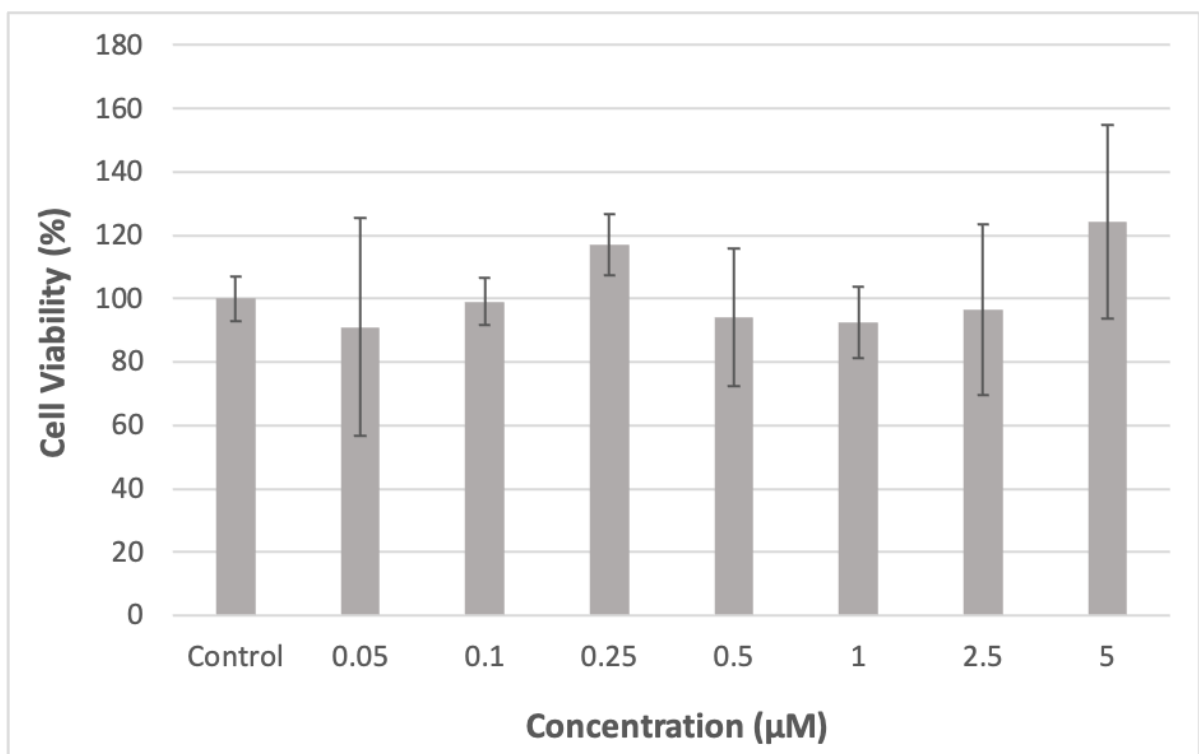


Figure 1. Cell Viability of HUVECs after the incubation with different ICG concentrations (0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2.5, and 5 μM). Each column represents the average of the normalized data \pm standard deviation ($n > 8$).

3.2 Cell Viability after PBM and Low-Dose PDT applications

The cell viability analysis of HUVECs was carried out at the end of the 7-day follow-up period according to the metabolic activity of the live cells determined by the MTT assay. As shown in Figure 2.a., there is an increase of approximately 3% after a single light treatment of PBM. The value increased to 7% after triple treatment of PBM. Figure 2.b. shows that the increase in cell viability was 5% after a single treatment of PDT and this value increased to 20% after triple treatment of PDT. Low-dose PDT resulted in clearly higher cell viability than PBM did for both treatment modalities. The outcomes of all triple treatments were statistically significant compared to the control group. Besides, the single treatment of PDT application was also significantly different from the control group. Single and triple ICG applications did not change the cell viability significantly. Only a slight decrease was observed in these groups after these applications (Figure 2).

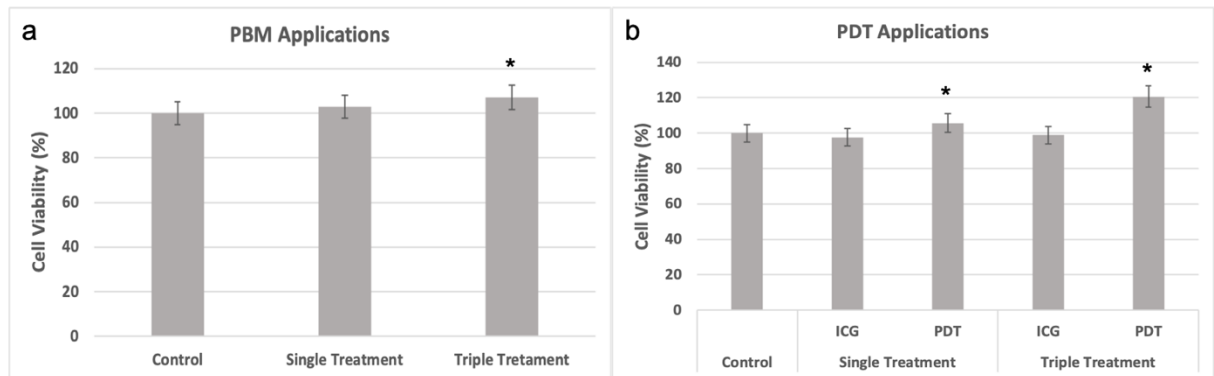


Figure 2. Cell viability analysis of HUVECs a) after PBM applications (single and triple treatment) and b) after only ICG and PDT applications (single and triple treatment) on the 7th day. Energy density was 1 J/cm², and ICG concentration was 0.1 μM. Each column represents the average of the normalized data ± standard deviation (n > 8). * symbolizes significant differences compared to the control group, *p*<0.05.

3.3 Morphological Analysis of HUVECs after Light Treatments

Figures 3, 4, and 5 show microscopic images of the cells after single and triple treatments of PBM, low-dose PDT, and ICG, respectively. It was observed that HUVECs successfully proliferated and elongated in PBM and low-dose PDT groups with respect to the control group. Especially the density of the cells irradiated with light three times was higher than the cells treated once or in the control group (Figures 3 and 4). As it was shown in Figure 5, single and triple ICG applications did not induce any change on HUVECs in terms of proliferation and elongation. There were no clearly observable connections and elongations between the cells treated with ICG. It can also be clearly observed that the cell density was higher and the conditions of the cells were better in the control group compared to the cells in ICG groups. (Figure 5).

These images were analyzed by the Angiogenesis Analyzer plugin of ImageJ software to measure the lengths of tube-like structures. As it is shown in Figure 6.a., the average length of endothelial cell tubular structure was increased to 111±2% in PBM, whereas there was an 8% decrease in the average length of tube-like structures of PDT groups after a single treatment. The average length of tubular structures was measured as 100±4% after a single ICG application. After triple treatments, the lengths of endothelial cell tubular structures were measured as 110 ± 2% in the PBM group, 118 ± 3% in the PDT group, and 98±2% in the ICG group (Figure 6.b.). All the changes in the lengths of tube-like structures obtained with PBM or PDT applications were statistically significant compared to the control group. However, the outcomes of the ICG groups were not statistically significant compared to the control group (Figure 6).

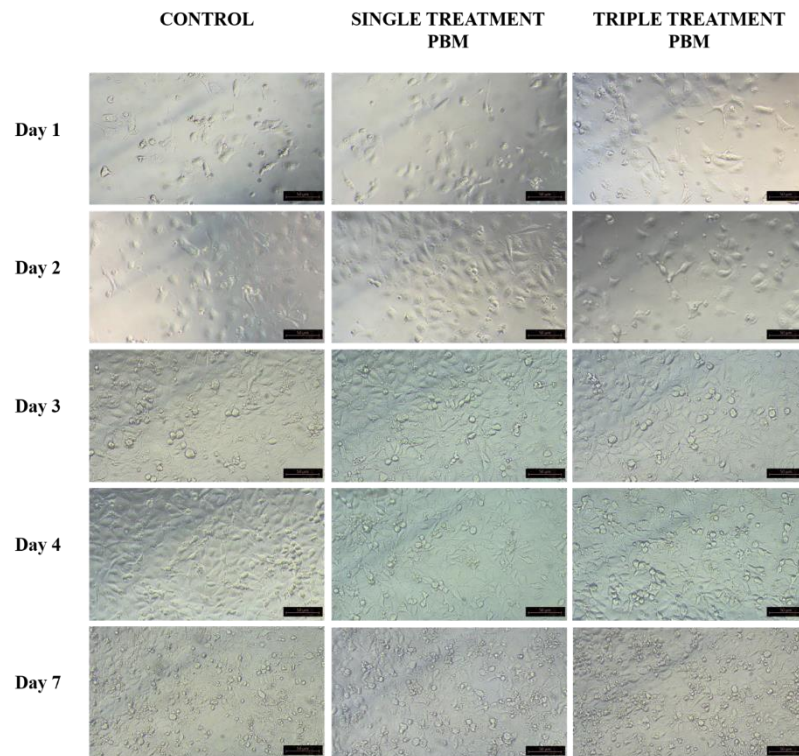


Figure 3. Microscopic images of HUVECs were obtained after single and triple PBM treatments on days 1, 2, 3, 4, and 7. Scale bar: 50 μ m.

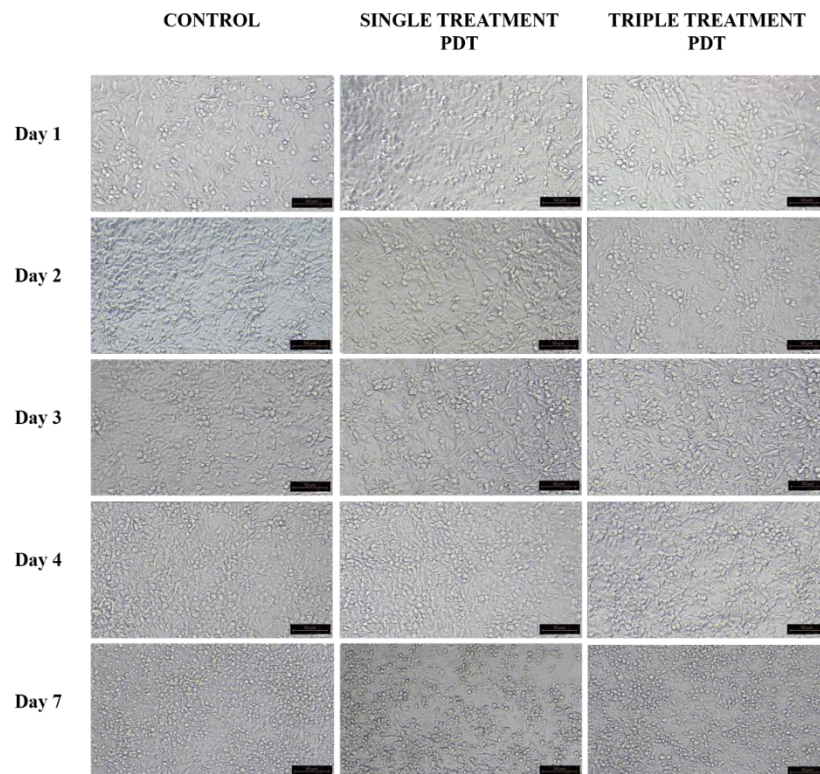


Figure 4. Microscopic images of HUVECs were obtained after single and triple low-dose PDT treatments on days 1, 2, 3, 4, and 7. Scale bar: 50 μ m.

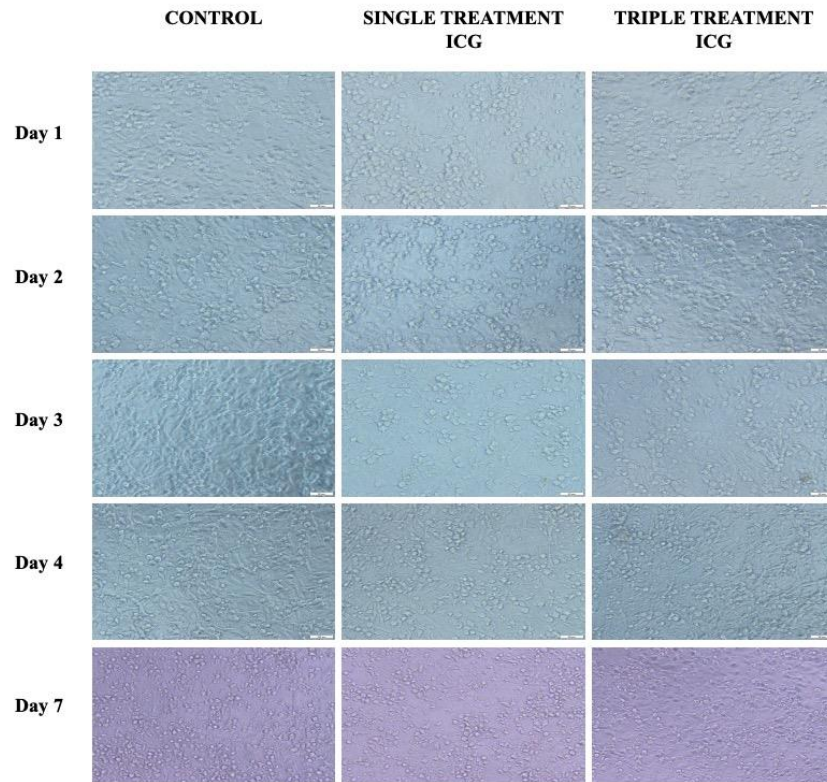


Figure 5. Microscopic images of HUVECs were obtained after single and triple ICG applications on days 1, 2, 3, 4, and 7. Scale bar: 50 μ m.

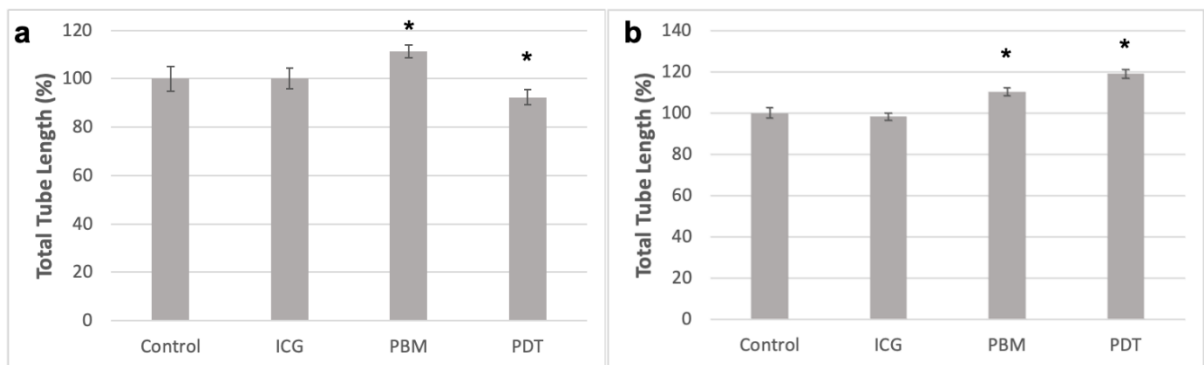


Figure 6. The total length of the tubular structures after a) single treatment of ICG, PBM, and low-dose PDT, b) triple treatment of ICG, PBM, and low-dose PDT on day 7. Each column represents the average of the normalized data \pm standard deviation ($n > 8$). * symbolizes significant differences compared to the control group, $p < 0.05$.

3.4 Intracellular ROS Generation

The intracellular ROS analysis shows that, surprisingly, low-dose PDT application caused a clear drop after the first treatment, while a single treatment of PBM did not cause a significant change in ROS level compared to the control group. After the second light treatment, both PBM and PDT application did not change the ROS level. The measured amounts were quite similar to the amounts in the control group. After the third light treatment, a slight increase was observed in both applications. This increase was higher in PDT which was approximately 10%, but it was less than 10% in PBM (Figure 7).

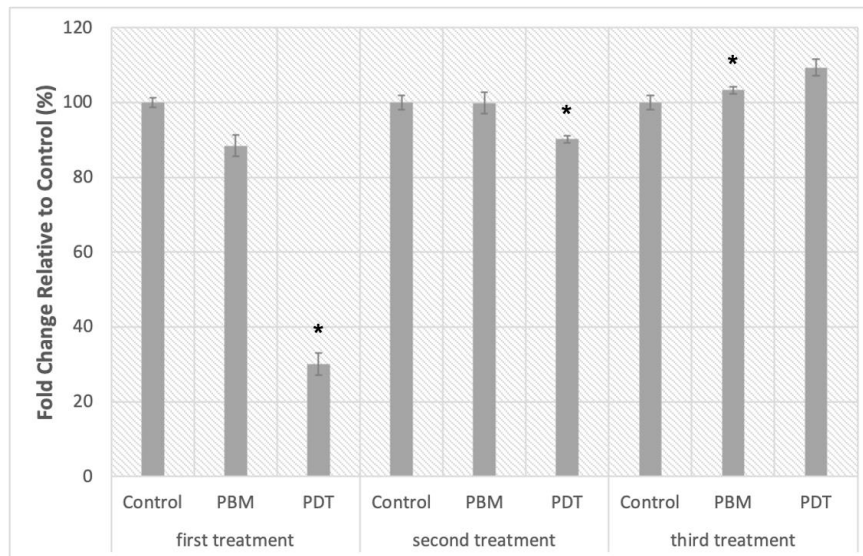


Figure 7. Intracellular ROS analysis in PBM and PDT groups after each light treatment. Each column represents the average of the normalized data \pm standard deviation ($n > 8$). * symbolizes significant differences compared to the control group, $p < 0.05$.

3.5 NO Release

The levels of NO released after the light applications were quite remarkable as shown in Figure 8. The level of NO released in PBM was nearly 4 times higher than that of the control and PDT groups after the first light application. The first application of PDT did not cause a significant NO release. After the second light application, surprisingly, the level of released NO in PBM decreased drastically back down to half of the value of the control group, whereby the level of released NO in PDT was nearly 4.5 times higher than that of the control group. After the last light application, the level of released NO in PBM was quite similar to the control group, whereby the level of released NO in the PDT group was still nearly 4.5 times higher than that of the control group and almost the same as the amount released after the second light application (Figure 8).

3.6 Mitochondrial Membrane Potential change

Figure 9 shows the fluorescent images of hyperpolarization in the mitochondria of HUVECs after light treatments. The intensity of red fluorescence in PBM and PDT was quite higher than in the control group and it became more intense day by day after other light applications (Figure 9).

Figure 10 shows the fluorescence intensity ratio calculated from the fluorescent intensities measured at 535 nm (for depolarization) and 595 nm (for hyperpolarization). On the first day, immediately after the light application, the mitochondrial membrane potential change was almost the same in PBM and PDT groups. It was an approximately 15% increase compared to the control group and an indication of hyperpolarization. After the second light treatment, the change in MMP for PDT was slightly higher than the value of PBM and it was still an increase up to 10% which was an indication of hyperpolarization. After the third light application, the increases in MMP change for both modalities were nearly 20% which still showed the hyperpolarization of HUVECs and with this application, the highest values in MMP change were reached (Figure 10).

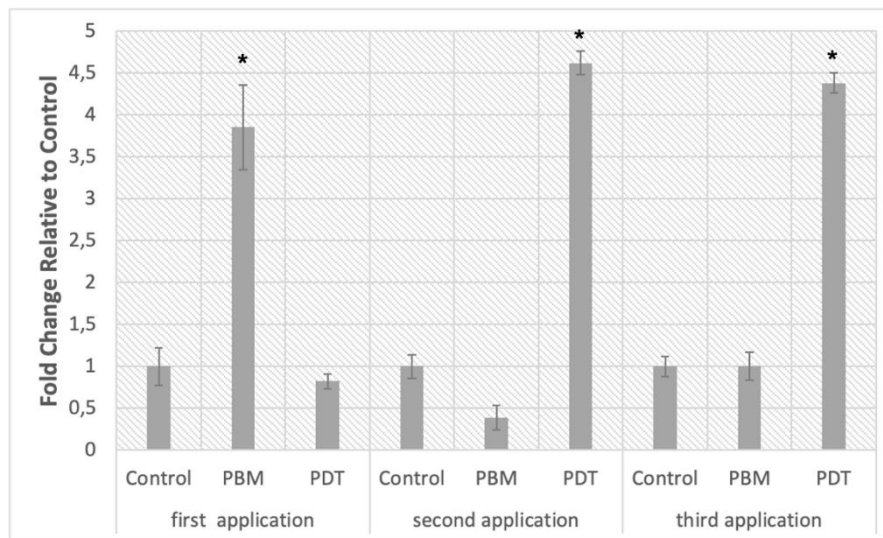


Figure 8. NO release in PBM and PDT groups after each light application. Each column represents the average of the normalized data \pm standard deviation ($n > 8$). * symbolizes significant differences compared to the control group, $p < 0.05$.

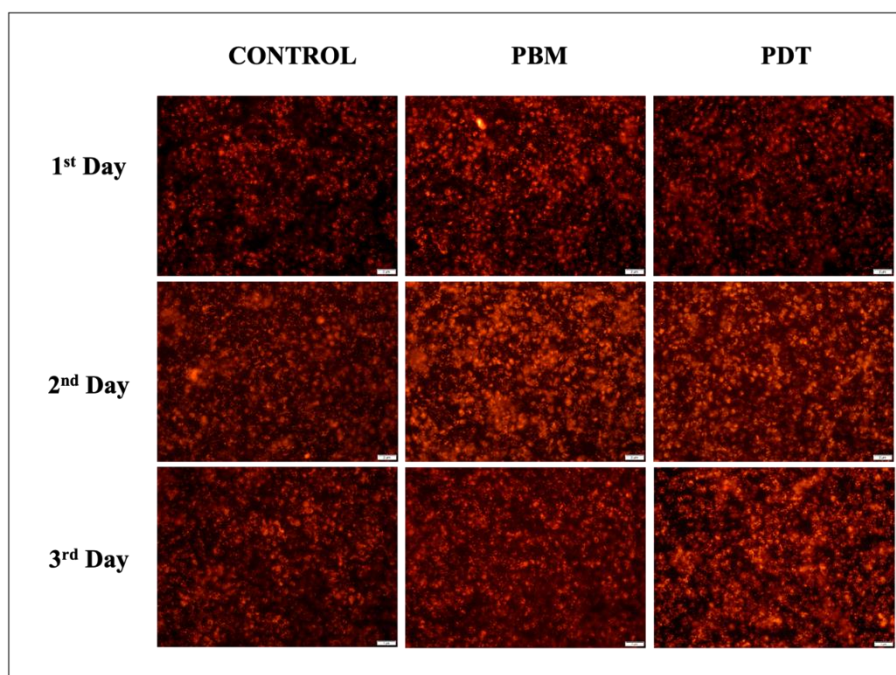


Figure 9. Hyperpolarization images of HUVECs depending on the mitochondrial membrane potential change after PBM and low-dose PDT applications on days 1, 2, and 3. The scale bar is 50 μm .

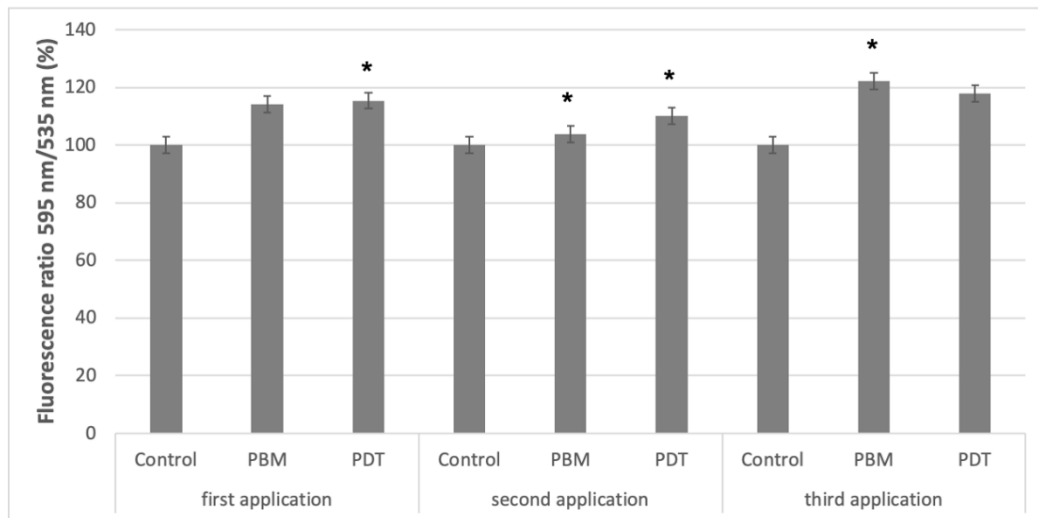


Figure 10. Mitochondrial Membrane Potential Change after each light application in PBM and PDT groups. Each column represents the average of the normalized data \pm standard deviation ($n > 8$). * symbolizes significant differences compared to the control group, $p < 0.05$.

3.7 Immunofluorescent Staining

Immunofluorescence staining of HUVECs was done on day 7 after single and triple treatments were performed on both groups, PBM and PDT. The images of the VEGF, PECAM-1, and vWf proteins had red color and the nuclei of the cells had blue-colored DAPI staining. The red color for each protein can be seen in each group, with different intensities as shown in Figure 11. It can be observed that vWf in the single-treated groups was weaker in staining compared to the triple-treated groups. The intensity of the red color for vWf protein in triple-treated low-dose PDT was significantly stronger than PBM. Similar outcomes were obtained for PECAM-1 and VEGF proteins. The expressions of PECAM-1 and VEGF were higher in triple-treated light applications. Low-dose PDT applications induced higher expressions of these proteins compared to PBM applications. The expressions of all these proteins were higher in the experimental groups compared to the control (Figure 11).

3.8 Relative Expressions of vWf and PECAM-1 gene

qRT-PCR analysis was performed for the vWf and PECAM-1 gene at the end of the 7-day follow-up for each group. As shown in Figure 12, all light applications whether they were single or triple, PBM or PDT, resulted in higher expressions of vWf and PECAM-1 gene compared to the control group. These genes were more highly expressed in triple-treated groups than in the single-treated groups. Besides, low-dose PDT applications were more successful to induce the higher expressions of these genes than PBM applications were. Furthermore, none of these applications were statistically significant compared to the control group.

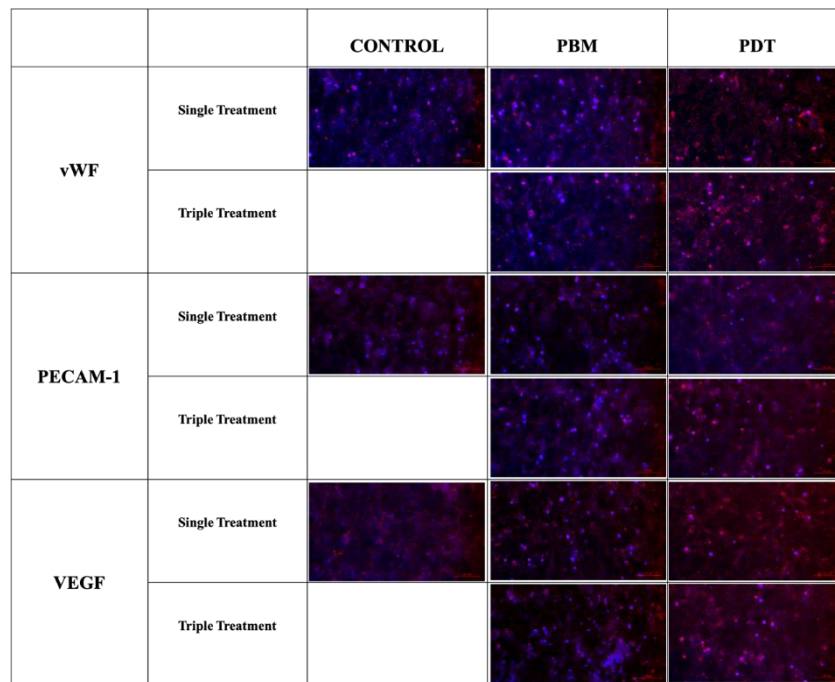


Figure 11. The microscopic images of the immunofluorescence staining of HUVECs in control, PBM, and low-dose PDT groups for vWf, PECAM-1, and VEGF proteins on day 7.

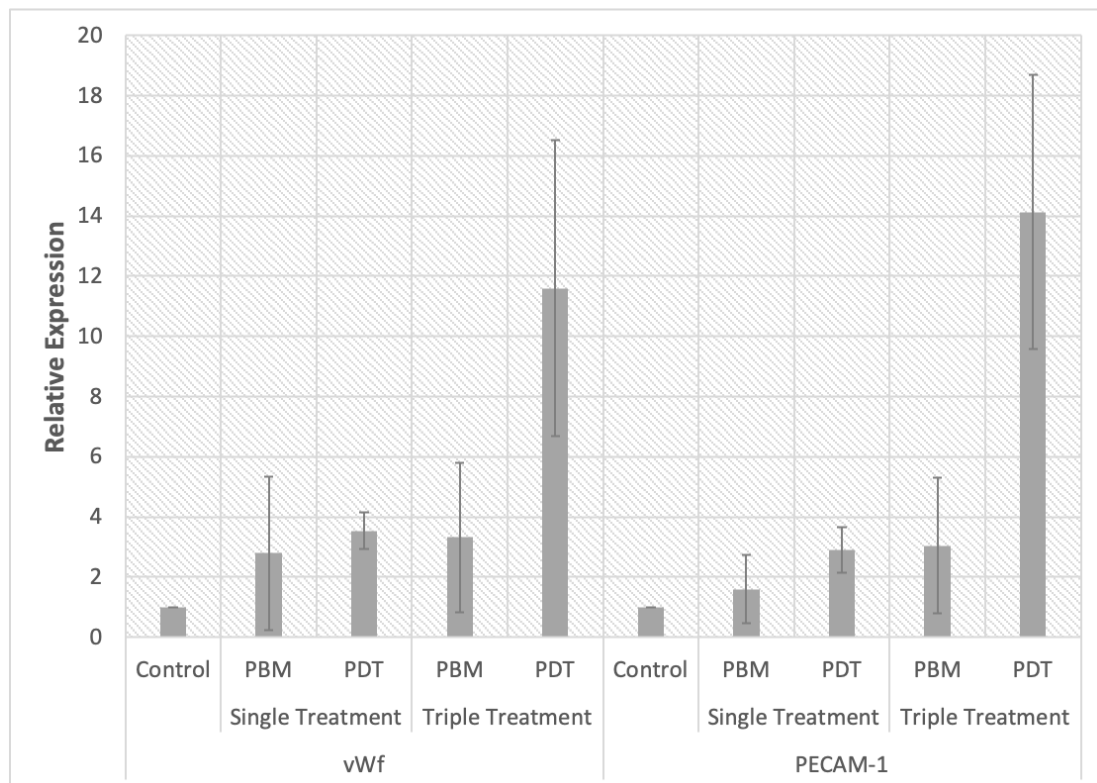


Figure 12. qRT-PCR analysis of PECAM-1 and vWF gene in the control, PBM, and low-dose PDT groups on day 7. Each column represents the average of the normalized data \pm standard deviation ($n > 8$).

3.9 Temperature Monitoring

In each light application, the temperature changes were monitored and only a little increase of approximately 0.2°C was observed as shown in Table 1. The combination of ICG and near-infrared light did not cause a significant temperature increase.

Table 1. Temperature measurements during light applications.

	1 st Light Application		2 nd Light Application		3 rd Light Application	
	PBM	PDT	PBM	PDT	PBM	PDT
Start (°C)	29.6	30	30.2	31	31.2	31
End (°C)	29.8	30.1	30.4	31.2	31.4	31.2
Δt (°C)	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2

4. DISCUSSION

This study comparatively analyzed the effectiveness of PBM and low-dose PDT on HUVECs towards vascularization and tried to reveal what happens if the light treatment was performed more than once. First, the appropriate ICG concentration was determined for low-dose PDT application to prevent any possible cytotoxic effect of ICG. It was seen that ICG was quite a safe photosensitizer and it can be used for this purpose. Among the ICG concentrations investigated in the cytotoxicity analysis, the possible lowest concentration, which was capable to produce enough ROS for PBM, but not too much to kill the cells, was chosen. With the concentration of 0.05 μM , there was a possibility to be very low and even not induce any significant cellular mechanism. Higher concentrations analyzed in this study may have the risk of causing cell death. Thus, 0.1 μM ICG was chosen for low-dose PDT applications. Even though it exhibited a decrease in cell viability, it cannot be regarded as a cytotoxic concentration. To achieve a certain amount of ROS production enough for biostimulation after light applications, but not to cause any detrimental effect which is related to a higher amount of ROS, 0.1 μM ICG seemed quite safe to use in PDT for biostimulative purposes. Another important parameter in low-dose PDT application was the energy density which should be properly optimized and not cause any significant thermal damage depending on the absorption of NIR light by cells/tissue [Ateş *et al.*, 2018; Khorsandi *et al.*, 2021]. According to the information in the literature, 1 J/cm² energy density was determined and used in PBM and low-dose PDT applications [Topaloglu and Bakay, 2022; Bölükbaşı Ateş *et al.*, 2020; Ateş *et al.*, 2017]. During all light treatments, the temperature change was monitored with a thermal camera and it was observed that only 0.2°C change was obtained at most, even in the presence of ICG which is a strong absorber of NIR light [Topaloglu *et al.*, 2015]. This result proved that the mechanisms of PBM or low-dose PDT applications with these parameters did not depend on the photothermal interaction mechanism and there was no risk for a thermal side-effect. Then the effects of ICG, PBM, and low-dose PDT applications were analyzed on cell proliferation. The increase in the metabolic activity of HUVECs was not high after any light application, even after the triple light treatment. The maximum increase was 20% which was obtained after the triple light treatment of low-dose PDT. Nevertheless, it was still significantly different from the control group. Only ICG applications, whether it was applied once or thrice, did not cause any significant change in the cell viability at the end of 7 days. It was clearly observed that ICG alone did not have the possibility to stimulate cell proliferation without light irradiation.

The morphological analysis of HUVECs which was performed on days 1, 2, 3, 4, and 7 also confirmed the increase in cell viability day by day for all light-treated groups. When the images obtained from single or triple light-treated groups were compared, the triple light treatment provided more positive effects on the cell viability. Besides, tube-like structure formation can also be visualized in microscopic images. After single light treatment, PBM promoted a better tubular structure formation compared to low-dose PDT application. After triple light treatments, low-dose PDT promoted a better tubular structure formation compared to PBM application. Nevertheless, PBM or low-dose PDT applications, whether they were applied once or thrice, provided more and longer tubular structures than the control group. Thus, it can

be said that both of these applications were successful at the differentiation of HUVECs. After only ICG applications, similar outcomes were obtained with the analysis of tubular structures as cell viability analysis. Whether ICG was applied once or thrice, it did not cause any significant change in the length of the tubular structures at the end of 7 days. The lengths of these structures in this group were similar to the lengths that were obtained in the control group. It was understood that ICG alone did not stimulate tubular structure formation without light irradiation.

To understand the action mechanism of these applications on cell differentiation, some mechanistic analyses were performed. One of the important molecules in these mechanisms is ROS which has a key role in many biological processes [Schieber and Chandel, 2014]. Thus, it was assumed that the production of intracellular ROS might have become predominant after these applications. Surprisingly, the detected intracellular ROS production was very low in low-dose PDT application after single light treatment. Besides, the amount of intracellular ROS in both PBM and low-dose PDT groups was lower than the amount measured in the control group. After the second light treatment, the amount of ROS increased to a certain extent but was still lower than the amount in the control group. After the third light treatment, its amount became higher than the control group for both applications. This outcome showed the importance of the light treatments applied more than once and it also correlated with the findings of the increases in cell viability and tube-like structure formation obtained after triple light treatment in PBM and low-dose PDT applications. When PDT was used to destroy pathogenic or cancer cells, a higher amount of intracellular ROS was produced with higher photosensitizer concentrations and light doses. The amount of ROS may become 5 times higher than that of the control group [Topaloglu *et al.*, 2021b]. When PDT was used at low-level for biostimulative purposes, Topaloglu *et al.* found that the increase in the amount of intracellular ROS produced after repeated low-dose PDT applications was around 10-20% [Topaloglu and Bakay, 2022] which was similar to the outcome obtained in this study. Thus, it can be said that lower photosensitizer concentration and light doses used in this study induced a similar amount of ROS production to the amount obtained in previous low-dose PDT studies.

NO release is an indication of PBM and as a signaling molecule, it has a key role to regulate some reactions ending up with some major outcomes of stimulative actions of light [Topaloglu and Bakay, 2022]. Thus, NO release was immediate with the first light application of PBM and the detected amount was more than 4-fold that of the amount in the control group. Similarly, the increase in cell viability and tubular structures obtained in PBM application was higher after the first light treatment, which proved the role of NO release in this mechanism. Later on, the amount of NO release was decreased until the value in the control group after the second and third light applications of PBM. We understood that the action mechanism of PBM was faster at first and it became slower in the upcoming treatments. On the other hand, the amount of NO release was nearly the same as the amount of NO in the control group after the first light application. After the second and third light applications of low-dose PDT, the amount of NO release was 4.5 times higher than that of the control group. The remarkable changes in this analysis were obtained after repeated light application for low-dose PDT. It also confirmed the results obtained after PDT applications in the previous analysis. It was understood that the action mechanism of PDT occurs slowly, but became more impactful on the differentiation of HUVECs. In previous PDT applications that aimed to destroy cancer cells, no significant change in NO release was observed when the photosensitizer concentration and light dose were used at a high level. The mechanism of the traditional PDT applications depends on the production of intracellular ROS which is toxic to the cells [Topaloglu *et al.*, 2021b]. In previous low-dose PDT studies, the amount of NO release obtained was similar to the outcomes obtained in this study. Topaloglu *et al.* obtained a nearly 50% increase in NO release when PDT application was used at a low level to induce neural cell differentiation [Topaloglu and Bakay, 2022]. However, the increase in NO release was more remarkable in this study, which was more than 4-fold that of the control group.

In the mechanism of PBM, light is absorbed directly by the mitochondria. This situation causes a proton gradient across the mitochondrial membrane. Related to this phenomenon, the biostimulation reactions end up with the hyperpolarization of the mitochondria which is related to the increase in cell viability. When cell death occurs, depolarization is observed [Topaloglu and Bakay, 2022]. To understand

the mechanism of PBM and low-dose PDT in this study, the MMP changes in HUVECs were visualized by a JC-1 probe for hyperpolarization/depolarization. As it was shown in Figure 9, hyperpolarization was more apparent in the experimental groups compared to the control group. As expected, a higher increase in MMP was observed after the single treatment of PBM application. The reason for this outcome should be the absorption of light directly by the COX of mitochondria in PBM applications [Topaloglu *et al.*, 2021a]. The changes in MMP continued with the consecutive light applications and low-dose PDT provided the same results as PBM did. It showed the importance of the triple light treatment to stimulate the cells continuously and to get more successful results in terms of cell differentiation. Besides, there was no indication of depolarization in the mitochondrial membrane which is related to cell death. This was the proof for PDT applications that did not induce any cell death mechanism, such as apoptosis.

HUVECs can form tube-like structures by expressing angiogenesis-related proteins such as VEGF, PECAM-1, and vWf [Müller *et al.*, 2002; Yaralı *et al.*, 2020]. Previous studies that examined the effect of red and near-infrared light on the expressions of the angiogenic markers showed that these wavelengths induced the expression of VEGF [Cury *et al.*, 2013; Basso *et al.*, 2013]. Similar results were obtained in this study, too. Immunofluorescence staining provided the findings of the increase in the expressions of vWf, PECAM-1, and VEGF. The expressions of these proteins in PBM and low-dose PDT applications were greater than in the control group. qRT-PCR analysis of the genes that express vWf, PECAM-1, and VEGF proteins confirmed the results of immunofluorescence staining. In qRT-PCR analysis, the expressions of the vWf and PECAM-1 genes were evaluated and in general overexpression of these genes was observed compared to the control group. Especially, the highest increases for both genes were obtained after the triple light treatment of PDT applications. This finding was in parallel with the findings of other analyses. In terms of cell viability, tube-like structure formation, intracellular ROS production, and NO release, the highest changes were always obtained after the triple light applications of low-dose PDT.

5. CONCLUSIONS

Light therapies have numerous beneficial effects. Biphasic dose-response of the cells towards therapeutic light applications broadens the fields and the purposes of the use of light in medicine [Topaloglu and Bakay 2022]. With the outcomes of this study, it can be concluded that PBM and low-dose PDT applications promote the vascularization of HUVECs. Thus, they can be a valuable tool in tissue engineering to accelerate the wound healing process. Besides, it was seen that PDT, which is commonly used to treat cancer and infection [Topaloglu *et al.*, 2021b], may also fasten cell proliferation/differentiation, wound healing, pain relief, etc. via some biochemical reactions inside the cells by keeping the parameters at low level [Topaloglu and Bakay 2022]. In this study, the therapeutic outcomes of PBM and low-dose PDT applications on HUVECs were quite similar to each other. Both of them were successful to induce tube-like structure formation. Nevertheless, low-dose PDT exhibited a little bit more effective result. Inducing the cellular mechanisms responsible for vascularization and the behavior of signaling molecules such as ROS or NO with the use of a photosensitizer and its excitation by an appropriate wavelength seems to be more effective in biostimulation, instead of provoking mitochondria in PBM. Besides, these light therapies were applied in two different modalities which were single and triple treatments in this study. Triple light treatments for both PBM and low-dose PDT showed better results, meaning that consecutive light treatments cause further impulses resulting in ongoing changes in cellular metabolism. We can also add that 808-nm of wavelength was also beneficial in inducing vascularization and did not cause any thermal side-effect which is very likely to occur in the infrared (IR) region, even in the presence of ICG. ICG, as a photosensitizer, did not induce a significant cytotoxic effect on HUVECs. Thus, they can be safely used without causing any harmful effects on the cells. Since vascularization is a big challenge in tissue engineering, these therapeutic light applications offer a safe way to improve and accelerate the wound healing process and the vascularization of the implanted tissue.

6. ACKNOWLEDGEMENT

This study was supported by İzmir Katip Çelebi University Scientific Research Project (2021-TYL-FEBE-0001). The authors are grateful to Emel Bakay, Assoc. Prof. Utku Kürşat Ercan, Assist. Prof. Didem Şen Karaman, and Assoc. Prof. Ozan Karaman for their valuable contributions.

REFERENCES

- Amaroli, A. et al., 2019, "Photobiomodulation with 808-nm diode laser light promotes wound healing of human endothelial cells through increased reactive oxygen species production stimulating mitochondrial oxidative phosphorylation", *Lasers in Medical Science*, Vol. 34, Nr. 3, pp. 495.
- Ateş, G. B. et al., 2018, "Indocyanine green-mediated photobiomodulation on human osteoblast cells", *Lasers in Medical Science*, Vol. 33, Nr. 7, pp. 1591–1599.
- Ateş, G. B. et al., 2017, "Methylene blue-mediated photobiomodulation on human osteoblast cells", *Lasers in Medical Science*, Vol. 32, pp. 1847-1855.
- Basso, F. G. et al., 2013, "Biostimulatory effect of low-level laser therapy on keratinocytes in vitro", *Lasers in Medical Science*, Vol. 28, Nr. 2, pp. 367–374.
- Beltrán, B. et al., 2000, "The effect of nitric oxide on cell respiration: A key to understanding its role in cell survival or death", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 97, Nr. 26, pp. 14602–14607.
- Borutaite, V. et al., 2000, "Reversal of nitric oxide-, peroxynitrite- and S-nitrosothiol-induced inhibition of mitochondrial respiration or complex I activity by light and thiols", *Biochimica et Biophysica Acta. Bioenergetics*, Vol. 1459, Nr. 2–3, pp. 405–412.
- Bölükbaşı Ateş, G. et al., 2020, "Photobiomodulation effects on osteogenic differentiation of adipose-derived stem cells", *Cytotechnology* Vol. 72, pp. 247-258.
- Carpentier, G. et al., 2020, "Angiogenesis Analyzer for ImageJ — A comparative morphometric analysis of "Endothelial Tube Formation Assay" and "Fibrin Bead Assay"", *Scientific Reports*, Vol. 10, Nr. 11568.
- Castano, A. P. et al., 2004, "Mechanisms in photodynamic therapy: part one-photosensitizers, photochemistry and cellular localization", *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, Vol. 1, Nr. 4, pp. 279–293.
- Cury, V. et al., 2013, "Low level laser therapy increases angiogenesis in a model of ischemic skin flap in rats mediated by VEGF, HIF-1 α and MMP-2", *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, Vol. 125, pp. 164–170.
- de Freitas, L. F., Hamblin, M. R., 2016, "Proposed mechanisms of photobiomodulation or low-level light therapy", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 22, Nr. 3, pp. 348-364.
- Hamblin, M. R., 2018, "Mechanisms and mitochondrial redox signaling in photobiomodulation", *Photochemistry and Photobiology*, Vol. 94, Nr. 2, pp. 199–212.
- Hawkins, D. et al., 2005, "Low level laser therapy (LLLT) as an effective therapeutic modality for delayed wound healing", *Annals of the New York Academy of Sciences*, Vol. 1056, Nr. 1, pp. 486–493.
- Hough, M. A. et al., 2014, "NO binding to the proapoptotic cytochrome c-cardiolipin complex", *Vitamins and Hormones*, Vol. 96, pp. 193–209.
- Huang, Y. Y., (2009), "Biphasic dose response in low level light therapy", *Dose Response*, Vol. 7, Nr. 4, pp. 358-83.
- Karu, T. I. et al., 2005, "Cellular effects of low power laser therapy can be mediated by nitric oxide", *Lasers in Surgery and Medicine*, Vol. 36, Nr. 4, pp. 307–314.
- Khorsandi, K. et al., 2021, "Low-dose photodynamic therapy effect on closure of scratch wounds of normal and diabetic fibroblast cells: An *in vitro* study", *Journal of Biophotonics*, Vol. 14, Nr. 7, e202100005.
- Mittal, M. et al., 2014, "Reactive oxygen species in inflammation and tissue injury", *Antioxidants & Redox Signaling*, Vol. 20, Nr. 7, pp. 1126–1167.

- Müller, A. M. et al., 2002, "Expression of the endothelial markers PECAM-1, vWf, and CD34 in vivo and in vitro", *Experimental and Molecular Pathology*, Vol. 72, Nr. 3, pp. 221–229.
- Onak Pulat, G. et al., 2021, "Role of functionalized self-assembled peptide hydrogels in in vitro vasculogenesis", *Soft Matter*, Vol. 17, pp. 6616–6626.
- Schieber, M., Chandel, N. S., 2014, "ROS function in redox signaling and oxidative stress", *Current biology: CB*, Vol. 24, Nr. 10, pp. R453–R462.
- Sibata, C. H. et al., 2000, "Photodynamic therapy: a new concept in medical treatment", *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, Vol. 33, Nr. 8, pp. 869–880.
- Terena, S. M. L. et al., 2021, "Photobiomodulation alters the viability of HUVECs cells", *Lasers in Medical Science* Vol. 36, pp. 83-90.
- Topaloglu, N. et al., 2015, "Antibacterial photodynamic therapy with 808-nm laser and indocyanine green on abrasion wound models", *Journal of Biomedical Optics*, Vol. 20, Nr. 2, 028003.
- Topaloglu, N. et al., 2016, "The role of reactive oxygen species in the antibacterial photodynamic treatment: photoinactivation vs proliferation", *Letters in Applied Microbiology*, Vol. 62, Nr. 3, pp. 230-236.
- Topaloglu, N. et al., 2021a, "Comparative analysis of the light parameters of red and near-infrared diode lasers to induce photobiomodulation on fibroblasts and keratinocytes: An in vitro study", *Photodermatology, Photoimmunology & Photomedicine*, Vol. 37, pp. 253-262.
- Topaloglu, N. et al., 2021b, "Induced photo-cytotoxicity on prostate cancer cells with the photodynamic action of toluidine Blue ortho", *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, Vol. 34, Nr. 102306.
- Topaloglu, N., Bakay, E., 2022, "Mechanistic approaches to the light-induced neural cell differentiation: Photobiomodulation vs Low-Dose Photodynamic Therapy", *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, Vol. 37, Nr. 102702.
- Yaralı, Z. B. et al., 2020, "Effect of integrin binding peptide on vascularization of scaffold-free microtissue spheroids", *Tissue Engineering and Regenerative Medicine*, Vol. 17, Nr. 5, pp. 595–605.
- Zhang, J. et al., 2016, "ROS and ROS-mediated cellular signaling", *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, Vol. 4350965.
- Zhang, X. et al., 2005, "Low-dose photodynamic therapy increases endothelial cell proliferation and VEGF expression in nude mice brain", *Lasers in Medical Science*, Vol. 20, Nr. 2, pp. 74–79.
- Zorov, D. B. et al., 2014, "Mitochondrial reactive oxygen species (ROS) and ROS-induced ROS release", *Physiological Reviews*, Vol. 94, Nr. 3, pp. 909–950.



LAND MANAGEMENT PARADIGM: GLOBAL AGENDA AND THE CASE IN TÜRKİYE

Orhan ERCAN

Ankara University, Faculty of Applied Sciences, Real Estate Development and Management Department, Ankara,
TÜRKİYE
orhanercan@ankara.edu.tr

Geliş/Received: 10.07.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 19.07.2022

ABSTRACT: Property ownership rights cannot be officially used for 70% of the world. Global calls for action have been made to create and protect property rights, particularly for the last three decades. Under the leadership of the United Nations, the issue of land management was examined from the economic, social, and environmental perspectives considering knowledge transfer, capacity building, and international cooperation, and efforts have been made to integrate global approaches with national conditions. Sustainable Development Goals and their implementation guides in terms of land management, i.e. Integrated Geospatial Information Framework and Framework for Effective Land Administration, are significant actors on the global agenda. This article reveals the concepts that emerged as a result of the global agenda, the development of land management and calls for action, higher education opportunities, and the main issues of the agenda. The study examines the global agenda considering the conditions of Türkiye and concludes that the successful Turkish Land Administration, which has many years of experience, should be modernized considering the new developments, and the clutter in geospatial data production should be eliminated and the efforts should be combined under a single corporate structure.

Keywords: Land management, Land administration, Land governance, Geospatial data, Sustainable development goals

Arazi Yönetim Paradigması: Küresel Gündem ve Türkiye'deki Durum

ÖZ: Dünyanın %70'inde arazi mülkiyeti haklarından resmi olarak yararlanılamamaktadır. Özellikle son otuz yılda mülkiyet haklarının oluşturulması ve korunması ile ilgili olarak global eylem çağrıları yapılmaktadır. Birleşmiş Milletler öncülüğünde bilgi transferi, kapasite geliştirme ve uluslararası iş birliği çerçevesinde arazi yönetimi ekonomik, sosyal ve çevresel bakış açılarıyla ele alınmış, küresel düzeydeki yaklaşımların ulusal koşullar ile entegre edilmesine çalışılmıştır. Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları ve bunun arazi yönetimi anlamında uygulama rehberleri olacak olan Bütünleşik Mekansal Bilgi Çerçevesi, Etkin Arazi Yönetimi Çerçevesi küresel gündemin önemli oyun kurucularıdır. Bu makalede, küresel gündem gereği ortaya çıkan kavramlar, arazi yönetiminin gelişimi ve eylem çağrıları, yüksek öğretim imkânları ve gündemin ana konuları ortaya konmuştur. Küresel gündem Türkiye koşullarında irdelenmiş, çok uzun yıllar deneyime sahip ve başarılı Türk Arazi İdaresinin yeni gelişmeler çerçevesinde

modernizasyonu ile mekansal veri üretiminde olan dağınıklığın giderilerek tek bir kurumsal yapıda toplanması sonuçlarına ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Arazi yönetimi, Arazi idaresi, Arazi yönetişimi, Mekânsal veri, Sürdürülebilir kalkınma amaçları

1. INTRODUCTION

About 70% of the world's population has no land-property relations. However, having a good land administration, which considers both informal and formal rights regarding the ownership and use of land, is essential for the economic and social development of nations (FELA 2020, UNGGIM 2015). The topic of Land Administration is regarded as the core component of land management. In this context, important guideline documents such as Land Administration for Sustainable Development (Williamson et al, 2010), Fit-For-Purpose Land Administration (Enemark et al., 2015), Fit-For-Purpose Land Administration Guiding Principles (UN-GLTN, 2015) were published to determine the place of land administration in the land management paradigm and to develop and implement its applications. The countries on the south of the equator have been observed to implement several projects with the understanding of fit-for-purpose.

Most of the world has been striving for having a land policy, land management instruments, institutionalization, collecting of geospatial data, and compliance with data standards despite the lack of technical staff, vocational higher education, capacity-building instruments, finance, and feudalism. On the other hand, developed countries have completed the institutionalization of land administration as a part of sustainable development. Therefore, geospatial data is collected within the framework of internationally accepted standards in these countries, and they use modern technology and try to improve geospatial data infrastructure and data sharing systems. Moreover, these countries strive to integrate their legacy systems with new technologies. Therefore, they try to have sustainable business models and focus on international networks, innovation, and digital transformation following a citizen-centered approach (Ercan, 2019). As can be seen, there is a huge digital divide between developed and developing countries.

It seems that the digital transformation goals of the United Nations (UN) cannot be achieved without solving the problems related to land and property. With this perspective, land management is a human and society-oriented structure at the very center of sustainable development, livable cities, and rural development.

Therefore, the UN has revealed the need to prepare the Integrated Geospatial Information Framework (IGIF) document to solve the spatial data problem, and the assigned expert group has completed the studies. Moreover, the UN's Committee of Experts on Global Geospatial Information Management (UNGGIM) has assigned the UNGGIM-Land Administration Expert Group in 2018. This group prepared the Framework for Effective Land Administration (FELA) document and presented it to the UN General Assembly. The document, which was approved by the General Assembly, is at the stage of printing. FELA is considered to be a framework document on Land Administration, and it is planned to support this document with IGIF. The UN plans to bridge the digital gap between developed and underdeveloped countries due to the land administration system and geospatial data and to achieve digital transformation by offering the FELA/IGIF approach as a world policy.

The awareness of the fact that land is one of the most important natural resources and the requirement for the effective use of land has increased. Due to the use of very similar terms in land management and applications documents translated from English, these terms and concepts should be clarified within the framework of common understanding for practitioners; this is required at least for Türkiye.

There are many graduate programs both in the world and in Turkey under different titles using terms such as urban, rural, real estate, environment, and cadastre.

In the world and in Türkiye, the duties and responsibilities of Land Registry Cadastre, Mapping and Land Registry, Cadastre, and Mapping Agencies have been gradually increasing as part of the global agenda. Therefore, calls for action have been made to re-organize them within the framework of building

cadastre and digital transformation. It is projected that the land administration and the institutions producing geospatial data in Türkiye will also be affected by this transformation.

This article examines the conceptual model of the land management paradigm, its global development, calls to action, education, the global agenda, and the current situation in Turkey from global perspectives. Increasing global developments in land management place a challenge on the professional agenda, and all countries learn lessons for themselves. Türkiye was examined from these perspectives, the findings were discussed and suggestions were made in the conclusion part of this research.

2. CONCEPTUAL MODEL OF LAND MANAGEMENT

Many terms seem to have quite similar meanings related to land. The fact that these terms evoke each other at least in terms of their linguistic aspect might cause confusion, and this sometimes complicates how and in what sense they are used. In Türkiye, Land Administration, Land Management, and Land Governance are the most confusing terms related to land. The fact that the meanings of the Turkish words corresponding to "management" and "administration" are close might cause this confusion. Similarly, it is observed that the words "land" and "soil" are sometimes used interchangeably.

The term "land" can be used together with the words governance, policy, paradigm, management, administration, development, ownership, value, use, spatial planning, geospatial data, spatial data infrastructure, and information system to form noun phrases. Also, these terms might be used together with other words such as sustainable, public, municipal, urban, urban periphery, rural, and agricultural. Therefore, the conceptual model of Land Management becomes even more confusing.

The word land refers to a physical object defined by its location, boundaries, and coordinates on the earth, but it is also considered as a whole with its rights, responsibilities, and restrictions on it. The land has a cognitive aspect as well as physical and legal aspects.

Cadastre, which is a concept at the heart of modern land administration, is used as the main instrument for managing parcels, thus, it essentially includes the land registry. The power of cadastres to improve land management and contribute to good governance is even greater in modern land administration (Willimson et al. 2010, Enemark 2005, 2006, 2010). Generally, cadastre includes the geometric description of the parcel associated with other descriptive records of the parcel such as the owner, value, its development, etc. (FIG, 1995). Article 1 of the Turkish Cadastre Law gives one of the best definitions of cadastre. According to this law, the term cadastre is defined as "According to country coordinate system, based on the cadastral or topographic cadastral map of the country, to set the land register stipulated by the Turkish Civil Law no. 4721 by defining their legal status by determining the boundaries of the properties on the land and map and to build the infrastructure of the spatial information system."

The land registry is created as a result of the initial cadastre, and it shows the geometric and legal status of the properties. In the countries where legal cadastre is applied, these registries are kept under the responsibility of the state to show the properties and the rights on the properties according to the principles of registration and clarity.

The land hierarchy defined by Willimson et al. (2010) describes an inverse pyramid with the land policy at the top and a land parcel at the bottom. Actually, the Land Management System is designed according to a Land Management Paradigm. A hierarchy is used to indicate the concepts in the paradigm and how a spatially efficient land management vision can be formed based on the cadastral parcel. Land policy is the legal regulatory framework for the management of the land, the main asset of people, and it defines the objectives and determines the values. The land management paradigm brings a holistic approach to the Land Management System and forces the land management processes to contribute to sustainable development. The paradigm ensures that the land management system facilitates land administration. Land administration activities include all activities related to the management of land and natural resources required to ensure sustainable development, while land ownership, value, use, and development include basic functions of land management. Also, the infrastructure for the implementation of land policies and land management strategies is provided by the land management system. Moreover,

it supports the efficient operation of land markets and the effective performance of land use management. Cadastre is at the center of the land management system. Spatial data infrastructure provides access and interoperability to cadastre and other land-related information. Cadastre ensures the spatial integrity and a single significant description of each parcel of land through a cadastre map, which is usually updated by a cadastral survey. Specifying the parcel ensures securing the rights to the land and controlling the land use. It also establishes a link between people's land-use patterns and their understanding of the land. The cadastral parcel is the basis of this hierarchy because the cadastral parcel reflects the way people use land in their daily lives. Cadastre is the key goal in defining the rights on land and managing restrictions and responsibilities in land use. The parcel establishes the relationship between people and the land administration system.

One of the rights defined on the land is the ownership right. The owner of a property might be a real entity, private entities, or the state. As a result of the acquisition of a property, the owner physically acquires the property right (rights, responsibilities, and restrictions) in the legal sense and the land itself in the practical sense. The land in the property subject to trade is used in any way, this refers to land use. Traditional, permissible, illegal, etc. ways of land use are possible. The change in economy and technology triggers change in society. As a result of this change, land use also changes (Mattsson et al., 2021). The ever-changing and evolving needs of societies may create the need for changing land use. Such changes are referred to as land development. Operations such as land use planning (land readjustment, land consolidation, expropriation, etc.) or spatial planning are required for land development.

The concept of "land governance" is defined as the policies, processes, and organizations which are used to manage natural resources, land, and property. A legal regulatory framework and operational processes are required for "sound land governance" to implement policies consistently and sustainably within a jurisdiction or a country (UN-GGIM 2015, Enemark et al., 2015). Today, "land governance" has become the essential principle by which land administration and land management are usually addressed. In 2012, this land administration approach was highlighted when the Voluntary Guidelines on Responsible Governance of Tenure, Land, Fisheries, and Forests in the Context of Food Security (VGGT) was accepted by the Member States (UN-GGIM 2015). FIG (2009) states that "land governance relates to policies, processes, and institutions in which land, property, and natural resources are managed. This includes decisions regarding access to land, rights on land, land use, and land development. Land governance is basically about setting and implementing sustainable land policies and establishing a strong relationship between people and land." FIG also notes that sound land management is essential and the contribution of land professionals is vital for ensuring sustainable development. "All countries have to deal with the management of land. They have to deal with land tenure, land value, land use, and land development management in some way or another. A country may have an advanced capacity, and it may combine all its activities in a single conceptual framework supported by sophisticated ICT models. Most probably, the capacity will consist of fragmented and essentially analog approaches."

In land management, land information is applied to land resources. It consists of several processes that include various professions and disciplines. In good practice, land management refers to the process of putting the physical resources of the land to good effect for facilitating social, economic, and environmental sustainability, which means underpinning and implementing sound Land Policies (UNGGIM 2015, Enemark 2006).

Land administration is defined by UNECE as the "processes of determining, recording, and disseminating information about the tenure, value, and use of land when implementing land management policies". The United Nations suggests that good governance in land management should include the existing formal system for the registration of land and property rights. This system should secure land ownership, investments, and other private and public interests in the property (UN, 2005). The land administration system, which is essential for the spatial enablement of society, includes land registration, cadastral surveying and mapping, fiscal, legal, and multi-purpose cadastres, and land information systems (UNECE, 1996). FAO defines land management as the way of implementing the rules of land use

rights and making them functional. Land Administration involves a wide range of systems and processes for managing the rights on land, land use regulation, land valuation, and taxation (FAO, 2012).

A policy can be regarded as a principle for providing guidance to decision-makers and achieving effective results. As a declaration of intent, a policy is implemented in procedures. Thus, the term policy may apply to public or private sector organizations, groups, and real persons. Therefore, public policy may be regarded as an administrative guideline for the actions taken by the executive bodies of the government. The land policy may address all guiding principles, which are important for rational results, to be followed in land use. It can be applied to prevent changes or to encourage changes in land use. The land policy requires various approaches according to the situation for developing measures and activities to be implemented by land administrators. The guiding principles may be general as well as specific. While public authorities may use mandatory tools for enforcement, private administrators have to act in accordance with the legal framework of land rights and regulations (Mattson et al., 2021, SDC 2012). The land policy deals with allocating resources, particularly rights for using the land to achieve maximum efficiency considering the natural environment and the welfare of the community in the future. In most countries, several ministries deal with different aspects of land policy. In good practice, (i) land administration operates within an overall framework of national land policies which should be clear and consistent, and (ii) the implementation of the land policy requires a multidisciplinary approach and an effective legal framework where land administration can operate, and (iii) the coordination among all organizations involved in land policy is critical for success (UNGGIM, 2015). Accordingly, the land policy for guidance the use of land in a broad sense.

In land valuation, the terms of appraisal and valuation might sometimes be confused. The term "appraisal" refers to an estimate or idea of the current market value of a property. On the other hand, the term "valuation" refers to a legally valid written report drawn up by valuers holding a valuation license on the property. Land valuation systems ensure control over the land management systems.

Within the framework of the above descriptions, the terms related to land management in this study can be summarized as follows:

The Land Policy is a legal document for land acquisition, use, and development.

The land management paradigm offers a conceptual framework for understanding land administration and innovation in land administration systems.

Land Use Management refers to the management of the use of a certain urban or rural land in accordance with the legal framework.

Land use planning refers to the process of deciding what/where/how the future land use will be.

In Türkiye, Land Administration is carried out by the General Directorate of Land Registry and Cadastre (TKGM). The tasks of establishing the cadastre and keeping it up-to-date, performing registry transactions under the guarantee of the state, and creating the spatial data infrastructure are among the duties assigned to it by the Constitution, Civil Code, and special laws. In addition to other tasks, it also has the following duties: carrying out inter-governmental co-ordination; meeting the needs of all public and private sector users; establishing and following up technical standards on geospatial information; coordinating activities to reduce duplication and increase efficiency; collecting data by various methods including field survey; processing data, exchanging data, and data dissemination; improving the efficiency of all land administration processes.

Land Development refers to the set of methods for changing land use, including land rights.

Spatial Planning refers to the process of determining future land use by considering specific projections.

Land valuation refers to the independent and objective appraisal of the potential value of a property, property project, or rights and benefits on a property for a particular date (TUDB, 2022).

3. GLOBAL DEVELOPMENT OF LAND MANAGEMENT AND CALLS FOR ACTION

International organizations announced the following important calls for action to raise awareness about land management and to guide practices due to the importance of the issue in the 1990s (UNGGIM, 2015):

- 1996, the Bogor Declaration of the United Nations Interregional Meeting of Experts on the Cadastre: developing modern cadastral infrastructures for improving the efficiency of the land and property markets; protecting all people's land rights; supporting the long-term sustainable development and land management; providing the spatial cadastral framework (usually a cadastral map) as the base map of the national spatial data infrastructure.
- 1997, the 8th Regional Cartographic Conference for Asia-Pacific: creating an advisory panel on cadastral surveying and mapping.
- 1999, Bathurst Declaration of the International Federation of Surveyors on Land Administration for Sustainable Development.
- 2011, Governing Council of the United Nations Human Settlement Program: Resolution on achieving sustainable urbanization by providing equitable access to land, housing, basic services, and infrastructure.
- 2012, United Nations Committee on World Food Security: The Voluntary Guidelines on the Responsible Governance of Tenure of Land, Fisheries, and Forests.
- 2014, Third High-Level Forum on United Nations Global Geospatial Information Management: The Beijing Declaration on Sustainable Development with Geospatial Information.
- 2015, UNGGIM: The Application of Geospatial Information – Land Administration and Management,
- 2015, The World Cadastre Summit: The Istanbul Declaration on Cadastre.
- 2016, The Addis Ababa Declaration on Geospatial Information Management Towards Good Land Governance for the 2030 Agenda.
- 2016, Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development.

Important publications were made by institutions and individuals specialized in this field to accelerate the process through knowledge transfer, capacity building, and creating awareness. The major publications on this topic are as follows:

- 1995, The FIG Statement on the Cadastre, FIG Publication No. 11
- 1996, UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) Land Administration Guidelines,
- 1996, Bogor-Declaration, FIG Publication No: 13 and 13A,
- 1998, Cadastre 2014, A Vision for a Future Cadastral System, Jürg Kaufmann and Daniel Steudler with the Working Group 1 of FIG Commission 7
- 2005, UNECE (United Nations Economic Commission for Europe). Land Administration in the UNECE Region, Development Trends and Main Principles,
- 2007, Williamson I., "Global Challenges for Land Administration and sustainable Development", Lincoln Institute of Land Policy,
- 2010, Williamson I., Enemark S., Wallace J. and Rajabifard A. Land Administration for Sustainable Development. Redlands: ESRI Press,
- 2010, Land Governance in Support of the Millennium Development Goals - a new agenda for land professionals. FIG/WB, FIG Publication No. 45,
- 2010, Policy Framework for Sustainable Real Estate Markets, Principles and Guidance for the Development of a Country's Real Estate Sector; United Nations Economic Commission for Europe Working Party on Land Administration Real Estate Market Advisory Group,
- 2014, Fit-For-Purpose Land Administration joint FIG/World Bank publication No: 60,
- 2020 (draft), UN GGIM Integrated Geospatial Information Framework (IGIF), Basılmış olabilir mi?
- 2020 (draft), UN GGIM Framework for Effective Land Administration (FELA).

In line with these developments, international organizations have taken on the task of developing, documenting, and supporting conceptual and implementation models of different features of land management, land administration, and land governance. These international organizations and the tasks they assumed are as follows:

- World Bank including Annual Land and Poverty Conference,
- UN-Habitat including GLTN,
- UN Food and Agriculture Organization (FAO),
- United Nations Statistics Division including UN-GGIM (global and regional),
- UN Economic Commission for Europe (UNECE) - Committee on Housing and Land Management - Working Party on Land Administration
- UN Economic Commission for Asia and the Pacific (UNESCAP) - Sustainable Urban Development, Environment & Development Division
- UN Economic Commission for Africa (UNECA) and the Africa Land Policy Initiative

Also, non-governmental organizations have supported the issues of land management, land administration, land use, and planning within the framework of their expertise. These organizations have made significant contributions to the production of strategic knowledge and knowledge transfer through their studies. Some of the non-governmental organizations well known by the professionals are as follows:

- International Federation of Surveyors (FIG),
- International Land Coalition
- Slum Dwellers International
- Lincoln Institute of Land Policy
- Bill and Melinda Gates Foundation
- Huairou Commission
- Oxfam International
- Omidyar Network

4. LAND MANAGEMENT EDUCATION

As a professional discipline, land management started with the history of humanity. Land management education in the world dates back several centuries. For example, the Moscow State University of Land Use Planning was founded in 1779. During the period between 1835 and 1917, the Institute trained more than 2,000 specialists, including almost 1,500 survey engineers. In 1992, it evolved into a University of Land Management which provides education for specialists in land law, land management, soil science, geobotany, geodesy, architecture, and rural planning. The university has been carrying out educational activities with its several faculties including the Faculty of Urban Cadastre, Faculty of Land Management, and Faculty of Real Estate Cadastre.

There are many departments and higher education programs on land management with an emphasis on technical issues are as follows: Sustainable Agricultural Land Management University of Florida; MSc in Conservation and Land Management, Bangor University; Sustainable Land Management, University Centre Myerscough; MSc in Rural Estate and Land Management Harper Adams University; MSc in Spatial Planning - Specialisation in Planning, Land and Real Estate Development, Radboud University; Cadastre and Land Management, Aalborg University, MSc in the Land Use Policy University of Nevada Reno; Master of Property Development, University of Technology Sydney; MSc in Land Management and Geospatial Science, Technical University of Munich; MSc in Sustainable Land Management, Ghent University.

With 70 years of experience, the Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation (ITC) is recognized worldwide for its achievements in the application-oriented approach in teaching, research, and capacity building in land management and geospatial technologies based on international cooperation and with more than 20,000 graduates.

Technical courses such as cadastre, geodesy, development plan implementation, land valuation, spatial data infrastructure, etc. are given in 23 universities that provide surveying engineering education.

Ankara University Faculty of Applied Sciences offers the only undergraduate program on Real Estate Development and Management in Türkiye. However, 13 universities in Türkiye offer graduate programs in Land Management and Policy, Land Management, Urban Transformation, and Property Valuation, Property Valuation and Development, Property Valuation and Management, Property Financing and Valuation, Land Management, Property Valuation and Development, Property Development.

Almost all of the above-mentioned graduate programs have compulsory and elective courses. In general, geodesy-based graduate programs have technical and natural sciences; cadastre, land use, and land management graduate programs focus on legal and economic sciences as well as technical sciences.

5. GLOBAL AGENDA

The following publications have created awareness of land management and highlighted the importance of the issue: "A Vision for a Future Cadastral System" published by FIG in 1998; the report on "Land Administration in the UNECE Region, Development Trends and Main Principles" published by UNECE in 2005; Williamson et al.'s book titled "Land Administration for Sustainable Development" published in 2010; Joint FIG/World Bank's document titled "Fit-For-Purpose Land Administration" published in 2014. These studies have become significant publications that establish the global agenda of land management.

In the last decade, the global agenda of land administration is determined by the following issues: global triggers such as global development, climate change, urbanization, digital transformation, globalization, economic reforms, extreme poverty, living conditions; new generation (privacy, high technology, social media), new roles of institutional structures; the expectations of other institutions such as justice/planning/agriculture from land management; social demands such as open data, shorter response times, increased efficiency, security of tenure; external actors such as UN, WB, academics, etc.; technological challenges such as Industry 4.0, mobile applications, space-based technologies, 3D/4D, smart cities, multi-source data, new sensors, and remote sensing (Bennett et al. 2011, Ercan, 2019, Joint Article by the FIG Commission Chairs 2021).

The 17 Sustainable Development Goals (SDGs) of the 2030 Agenda for Sustainable Development were adopted by world leaders in September 2015 (Figure 1). These SDGs officially came into force on 1 January 2016 after a historic UN Summit. These SDGs will apply across the world from 2016 through 2030. They will mobilize efforts to tackle climate change, fight inequalities, and end all forms of poverty while ensuring not to leave anyone behind. These 17 goals and 169 targets reveal the scale and ambition of the agenda (FELA, 2020). The goals, which are action-oriented and global in nature, are applicable universally. The targets are defined as aspirational global targets. Each government set its own national targets in line with the global level of ambition. However, member states took into account their national circumstances. Integrating social, economic, and environmental aspects, the goals and targets consider their interlinkages for achieving sustainable development in all aspects. More than 70% of the targets are related to geospatial technologies and land administration. It is not possible to achieve these SDGs unless issues related to land ownership, use, value, and development are resolved in the common ground of a spatial data infrastructure.



Figure 1: Sustainable Development Goals

In August 2018, the United Nations IGIF Committee of Experts assigned its FELA Expert Group to prepare a document for securing and documenting, recording, and recognizing land and property rights for all.

This FELA document acts as an overarching policy guideline, and it can be used as a reference by the Member States for developing, reforming, renewing, modernizing, strengthening, or monitoring land administration.

An effective land administration system should meet the demands of all people, and must achieve the following targets:

- i. Developing confidence and trust, promoting safety, security, peace, and peacebuilding,
- ii. Allowing economic development by supporting equitable and transparent land value capture revenue systems,
- iii. Accelerating the proportion of the population with tenure security,
- iv. Strengthening multidisciplinary and multisectoral participation to achieve integrated geospatial information,
- v. Ensuring participatory and inclusive land use, and land use planning,
- vi. Contributing to smart and resilient rural and urban societies by ensuring equitable spatial/land-use planning, and land development,
- vii. Promoting the recognition of the inherent rights of indigenous and vulnerable peoples to their lands, territories, and resources, and recognizing collective customs, traditions, and customary tenures in line with existing obligations in accordance with national and international law,
- viii. Encouraging efficient, sustainable, and fair land markets, where appropriate, that take into account land tenure, value, use, and land development aspects,
- ix. Enabling partnerships, bringing together and building knowledge, skills, and experiences on the ownership, value, use, and development of the land,
- x. Catering to all circumstances, cases, and individuals during peace and prosperity, in stressful and challenging times (including conflicts and disasters, human displacement and forced migration, food and water scarcity, and poverty), and
- xi. Promoting readiness and resilience on climate change issues, and supporting conservation, biodiversity, and sustainability of the ecosystem.

According to the (FELA), land administration answers the questions of ‘who’, ‘what’, ‘when’, ‘where’, and ‘how’ about ownership, use, value, and development of the land. Land administration can be defined as the process of determining, recording, disseminating, and updating information about the relationship between land and people. Therefore, land administration is assumed responsible for constantly aligning processes and resources with the dynamic demands of society. The word ‘land’ should be considered as

a general term representing also the water bodies (lakes, rivers, seas, oceans, etc.) and spaces below and above the ground, i.e., subsurface spaces and air space.

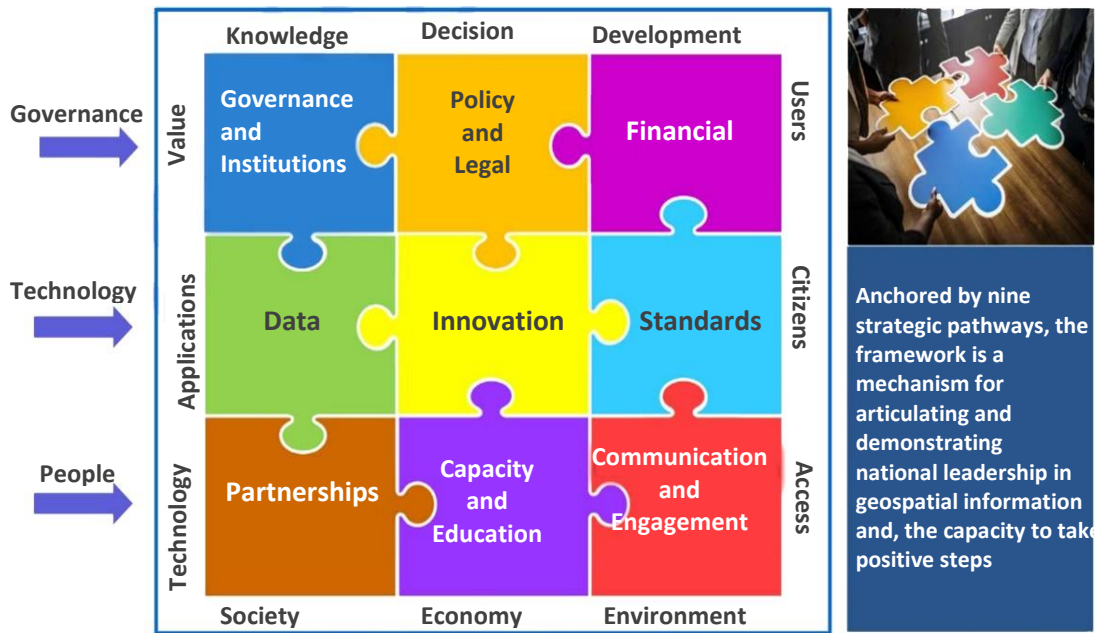


Figure 2. Nine Strategic Pathways of the IGIF

With nine strategic pathways, the joint point approach of FELA and IGIF, the issues of land administration and geospatial data were emphasized based on governance, technology, and people in the context of society, economy, environment, knowledge, decision, development, technology, applications, value, users, citizens, and access (Figure 2). Moreover, the issues of data, innovation, standards, institutions, and partnerships were also highlighted among others.

The global agenda underlines the importance of geospatial data, which is described as the "digital currency", in the evidence-based decision-making process of nations, as well as Land Administration. In Part 3 of the IGIF, Country-Level Action Plans regarding geospatial data were modeled in line with the how, when, and who concept.

6. LAND ADMINISTRATION AND LAND MANAGEMENT ORGANIZATIONS IN TÜRKİYE AND THE REQUIREMENT FOR INTEGRATED GEOSPATIAL DATA

6.1. Land Administration in Türkiye

In Türkiye, the General Directorate of Land Registry and Cadastre (TKGM) is responsible for the land administration. The first Land Registry Organization was established in 1847, and it continued to provide service under various titles until 1923 when the Republic of Türkiye was founded. The General Directorate of Land Registry was founded in 1924. Then, the cadastral unit was added to the organization in 1925. Since then, the TKGM has been carrying out the land registry and cadastral activities in Türkiye. TKGM has been operating as a public organization affiliated with the Ministry of Environment, Urbanization, and Climate Change since 2011. The main roles and responsibilities of TKGM are as follows: (i) ensuring the reliable registration of the land registry, which is the responsibility of the state; (ii) making all kinds of contractual and non-contractual transactions related to land and immovable property; (iii) conducting the cadastral survey in Türkiye, monitoring the changes, providing the renewal and updating of the cadastral maps, and thus, (iv) building the national spatial information system infrastructure (Ercan, 2021).

The organization of TKGM has a General Directorate and Regional Directorates (24), Provincial Cadastre Directorates (81 Directorates + Licensed Cadastre Bureaus), and Land Registry Directorates (973

Directorates). Land registry procedures are carried out by the land registry offices. With an amendment of the law in 2022, public notaries were also authorized to prepare the contracts.

In the last quarter-century, TKGM has automated land registry activities using the Land Registry and Cadastre Information System (TAKBIS), built Continuously Operating Reference Stations (CORS-TR), completed the rural area cadastre throughout the country, renewed the rural cadastre for about 15 million parcels, started 3D map production projects, and cooperated with the General Directorate of Forestry for establishing forest cadastre and supported the establishment of the forest cadastre. The cadastral data were digitized and presented to the use of citizens and companies through the Spatial Property System (MEGSIS) using the parcel query mobile application for informative purposes without taking legal responsibility. TKGM has become a data provider in terms of providing registry and cadastral data.

As part of the changing and developing conditions, it has transformed the Research Planning Coordination Department into the Information Technologies Department, and it strengthened its organizational structure by establishing the Land Valuation Department in 2019.

6.2. Demand for Geospatial Data

In Türkiye, similar to other countries, the military mapping service is provided by the General Command of Mapping (GCM) while large-scale maps were produced by TKGM and Iller Bank (IB) depending on their purpose. The production of the small-scale map series was carried out under the responsibility of the General Command of Mapping. 5K standard topographic maps were produced by TKGM and GCM using photogrammetric methods under the coordination of the Interministerial Coordination and Planning Board for Mapping. IB tendered 1K maps to the private sector in line with the demands of municipalities. Later on, GCM worked with the private sector on the small-scale map renewal projects while TKGM worked with the private sector in establishing cadastre and renovation projects.

The main duty of GCM, which is a military organization affiliated with the Ministry of National Defense, is to prepare all maps and plans required for the defense of the country. In accordance with the amendment of the law made in 2018, GCM was re-organized under the name of General Directorate of Mapping (GDM) as a military General Directorate. With the transformation of IB, which has an important role in the production of large-scale maps required by municipalities for spatial planning and engineering infrastructure projects, and provides the financing of the projects, into a joint-stock company, its large-scale map production activities have been reduced to a minimum.

In addition to these ones, several organizations, including municipalities, the General Directorate of Agricultural Reform, General Directorate of Highways, and General Directorate of State Hydraulic Works produce geospatial data. Large-scale map production is carried out in accordance with the Regulation on the Production of Large-Scale Maps and Map Information.

In 2011, the General Directorate of Geographic Information Systems was established to carry out works and procedures regarding the establishment, use, and development of the national geographic information system, to tender these works, to establish the standards of urban information systems related to the planning, mapping, infrastructure, and superstructure activities of local governments and to encourage their widespread use, and to operate the National Geographic Information Portal.

As can be seen, no organization produces geospatial data as part of engineering and planning purposes. Each organization produces geospatial data for its own purposes.

7. DISCUSSION AND RESULTS

In the conceptual approach to land management, there is confusion in many countries, particularly in Türkiye. The fact that the Turkish words for the term's "governance", "management", and "administration" have similar meanings was found to be the reason for this confusion. Therefore, the conceptual model of land management was examined as a separate section in the present study to ensure conceptual clarification.

The history of higher education on land management in the world dates back to 300 years ago. As of today, 13 universities in Turkey have been offering graduate programs on land management under different titles. There seems no significant bottleneck in terms of land management education in the country.

The UN document titled "Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development" was published in 2016. The 2030 Agenda Sustainable Development Goals are a global action plan. Land administration and geospatial data mostly take part at the core of sustainable development goals. Preparations for effective land management and integrated geospatial information are carried out by the United Nations due to their importance. Both issues will be frequently included in the world professional public opinion and countries' national policies as of 2023. Non-governmental organizations such as FIG will mature the details of these issues by holding forums on them to inform the national members in terms of implementation in accordance with the national conditions and to ensure knowledge transfer.

Land administration, which is the basic component of the land management paradigm, is not an organization that only answers questions such as what, where, owner, and surface area based on ownership of the parcel. Beyond that, it evolves into a structure that includes the ownership, use, value, and development of the land through the spatial data infrastructure. It is obvious that all land administrations will experience this evolution in one way or another with the new tasks they will undertake. TKGM, which has already started these processes, needs to be restructured for establishing an effective land administration system that models human-land relations.

Digital geospatial information now provides us with much more than a simple map. Geospatial data integrated with the location constitutes the basis of public services as well as services for citizens. Geospatial data, which constitutes the digital version of our world, is also an integral part of the digital society and the digital economy. Geospatial data describes the relationship between humans and places.

Public institutions in Türkiye produce maps as the basis of their land-related projects as part of the powers granted to them by law. Particularly in the last three decades, map production projects are carried out by tendering them to the private sector.

Besides the traditional purposes of maps, digital maps offer us a wide range of use areas from social inclusion to health and education, from smart cities to industrial development. In other words, apart from the production of geospatial data that public services need, it should be re-discussed in a way that defines the relationship between people and place, provides all kinds of geospatial data that decision-makers need in the accurate decision-making process, ensures the development of e-economy and e-society, responds quickly to the resting and learning processes of the generation Z, and supports tourism and cultural activities.

Despite the breakthroughs in recent years, the institutions of Türkiye are rich in data however they are poor in information. Some of the data is kept in corporate silos. It is known that some of the datasets that can be presented in the digital environment have several problems in terms of their compatibility with the ground.

Similar to many countries in the world, Türkiye should also modernize land administration and geospatial information management, particularly in terms of their governance and institutions, legal and policy aspects, data (from data theme to the creation and delivery of data), standards (legal, semantic, data, technical interoperability), data models (LADM) and dissemination, business model, communication, and engagement.

Considering these issues,

- 1) TKGM should be organized to carry out land ownership, use, value, and development activities, TAKBIS should have a data model complying with an international standard such as LADM. TAKBIS should be redesigned within this framework and transformed into a land registry and cadastre information system rather than just a registry information system. Compliance of the land registry and cadastral data with the ground must be ensured. TKGM should be supported by a fully electronically managed infrastructure. TKGM, which produces and registers legally valid spatial data, should be at the very center of the digital transformation.

- 2) Besides the traditional productions of maps and geospatial data, citizen-society, and state-oriented significant data should also be produced by using disruptive technologies (Internet of Things, Cloud, Artificial Intelligence, Virtual Reality, Augmented Reality, Big Data, Blockchain, etc.).
- 3) The organizational clutter in map production should be eliminated. It is obvious that the General Directorate of Mapping is an essential organization for producing the spatial data needed for the development of the country, digitizing the data in the silos in accordance with the standards, structuring these data, and making them available for presentation. This problem can be modeled in two ways:
 - a) A new General Directorate can be established.
 - b) Existing organizations such as TKGM or the General Directorate of Geographical Information Systems might be turned into an organization responsible for producing geospatial data by granting the authority to produce geospatial data in addition to their current duties.

8. CONCLUSIONS

The world has been changing, and technology has been leading the digital revolution (transformation). The key to this revolution is how the life of an ordinary person changes with these technologies. Digitalization has already deeply affected the business world, and new spatial technologies have been becoming ordinary in our daily lives. The concepts of artificial intelligence (AI), the Internet of Things (IoT), and big data technologies have been reformatting industries, societies, and the way we live. The digital revolution refers to the implementation of the integration of spatial data, data analytics, and real-time operations. This revolution requires the collection and analysis of land management / geospatial data in a production environment with an opportunity to rapidly change the way the industry responds to society's demands.

Land administration and geospatial data are the leading issues of Digital Transformation. The significant conclusion of this study is that institutional reinforcements are needed in Land Administration and Geospatial Data in Türkiye. In this context, land administration, which is the core component of land management, should be strengthened as part of the new tasks to be undertaken, and it should be institutionalized by eliminating the organizational clutter on the production of geospatial data, which is the cornerstone of both land administration and digital transformation.

This article aims to create a platform for discussing the preliminary evaluations put forward in a broad perspective considering the national conditions and calls for further research on the subject.

REFERENCES

- Bennett, R., Rajabifard, A., Kalantari, M., Wallace, J., Williamson, I., 2011, "Cadastral Futures: Building a New Vision for the Nature and Role of Cadastres", International Federation of Surveyors Article of the Month – June 2011.
- Enemark, S., 2005, "Understanding the Land Management Paradigm", FIG Commission 7 Symposium on Innovative Technologies for Land Administration, Madison, Wisconsin, USA, 19-25 June 2005.
- Enemark, S., 2006, "Understanding the Land Management Paradigm", GIM International, January 2006, (access date: 09 July, 2022), https://www.researchgate.net/publication/228342504_Understanding_the_land_management_paradigm.
- Enemark, S., 2010, "The Evolving Role of Cadastral Systems in Support of Good Land Governance, The Digital Cadastral Map", FIG Commission 7 Open Symposium Karlovy Vary, Czech Republic, 9 September 2010.
- Enemark, S., Bell, K.C., Lemmen, C., Laren R.M., 2015, Fit-For-Purpose Land Administration, Joint FIG/WorldBank Publication, FIG Publication No: 60.

- Ercan, O., 2019, "Industry 4.0 and Its impact on Land Administration", Keynote Speech, Smart GEO Expo 2019, 7-9.8.2019, Seoul, South Korea (unpublished).
- Ercan, O., 2019, "Land Administration in the Cross-section of SDGs and Disruptive Technologies", FIG Commission 3 Annual Workshop and Meeting, Advances in Geodata Analytics for Smart Cities and Regions, Cluj-Napoca, Romania, 23 - 26 September 2019, <https://sgr.ugr.ro/2019/abstract.php>, (access date: 09 July 2022).
- Ercan, O., 2021, "A closer look at Turkish cadastre and its successful completion", Land Use Policy, Volume 110, November 2021, <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104951>.
- FAO, 2012, Voluntary Guidelines on the Responsible Governance of Tenure of Land, Fisheries, and Forests in the Context of National Food Security, Food and Agriculture Organization of United Nations (FAO), Rome.
- FIG, 1995, The FIG Statement on the Cadastre, International Federation of Surveyors (FIG) Publication No. 11.
- FIG, 1999, The Bathurst Declaration of Land Administration for Sustainable Development, International Federation of Surveyors (FIG) Publication No. 21.
- FIG/WB, 2014, Fit-For-Purpose Land Administration, joint FIG/World Bank publication No. 60.
- Joint Article by the FIG Commission Chairs, 2021, "Key Global and Technology Drivers Impacting Surveying, Reflections by the FIG Commission Chairs", GIM International, (access date: 9 July, 2022), <https://www.gim-international.com/content/article/key-global-and-technology-drivers-impacting-surveying>, (access date: 9 July, 2022).
- Mattsson H., Lindner G., Mansberger R.; "Higher Education on Land Management and Land Administration", (access date: 12 February, 2021), <http://www.bgsha.ru/files/docs/faculties/izkim/proekt%20530690/material/12.pdf>.
- Moscow State University of Land Use Planning, <http://www.ryzmoskva.pф/>, (access date: 9 July, 2022).
- SDC Agriculture and Food Security Network, 2012, "Land Governance Focus Area Land Governance", (access date: 09 July, 2022), https://www.shareweb.ch/site/Agriculture-and-Food-security/focusareas/Documents/land_governance_terms.pdf.
- UN/ECE, 1996, Land Administration Guidelines, ECE/HBP/96. United Nations: New York, Geneva.
- UN, 1996, "The Bogor Declaration on Cadastral Reform", A United Nations Interregional Meeting of Experts on the Cadastre. Bogor, Indonesia 18-22 March 1996.
- UN, 2005, Land Administration in the UNECE Region. Development trends and main principles, Economic Commission for Europe. New York and Geneva, ECE/HBP/140. UNECE Information Services.
- UN-GGIM, 2015, The Application of Geospatial Information – Land Administration and Management, UN-GGIM Version 3.1, 13 July 2015.
- UN-HABITAT, UN-GGIM-AP, GLTN., 2016, Fit-For-Purpose Land Administration Guiding Principles, <https://un-ggim-ap.org/sites/default/files/media/meetings/Plenary05/201607/W020161027646559416583.pdf>, (access date: 9 July, 2022).
- UN-GGIM, 2020 (draft), "Integrated Geospatial Information Framework".
- UN-GGIM, 2020 (draft), "Framework for Effective Land Administration".
- TDUB, 2022, Turkish Associations of Appraisers, <https://www.tdub.org.tr/>, (access date: 9 July, 2022).
- WCS, 2015, "Istanbul Declaration on Cadastre", The World Cadastre Summit, <https://docplayer.net/9375164-Istanbul-declaration-on-cadastre-in-the-world-cadastre-summit-2015.html>, (access date: 9 July, 2022).
- Williamson, I., Enemark, S., Wallace, J., Rajabifard, A., 2010, "Land Administration for Sustainable Development", Esri Press, 380 New York Street, Redlands, California 92373-8100.