

ISSN 1012-2354



ERCIYES ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

*Erciyes University
Journal of
the
Institute
of
Science and Technology*

Cilt (Vol.): 40

Sayı (No):2



ERCİYES ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

Erciyes University Journal of Institute of Science and Technology

ISSN: 1012-2354



Genel Yayın Yönetmeni

Prof. Dr. Oktay ÖZKAN, Erciyes Üniversitesi

İmtiyaz Sahibi

Prof. Dr. Fatih ALTUN, Erciyes Üniversitesi

Baş Editör

Prof.Dr. Emel KIZILKAYA AYDOĞAN, Erciyes Üniversitesi

Editör

Prof. Dr. M. Duran TOKSARI, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. M. Gökhan HALICI, Erciyes Üniversitesi

Düzenleme Editörleri

Arş. Gör. Hüseyin ÖZKAYA

Arş. Gör. Mehmet Uğur TÜRKDAMAR

Esra TURAN

Editörler Kurulu

Prof. Dr. Abdulkadir BİLİŞİK, Erciyes Üniversitesi, kbilisik@erciyes.edu.tr

Prof. Dr. Mustafa Serdar ÖNSES, Erciyes Üniversitesi, onses@erciyes.edu.tr

Prof. Dr. Kamil KOÇ, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, kamil.koc@cbu.edu.tr

Prof. Dr. Musa SARI, Gazi Üniversitesi, msari@gazi.edu.tr

Prof. Dr. Orhan BÜYÜKGÜNGÖR, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, orhanb@omu.edu.tr

Prof. Dr. Hasan KÜÇÜKBAY, İnönü Üniversitesi, hasan.kucukbay@inonu.edu.tr

Prof. Dr. Mehmet AKKURT, Erciyes Üniversitesi, akkurt@erciyes.edu.tr

Prof. Dr. Tuncay CANDAN, The American University of the Middle East, tuncay.candan@aum.edu.kw

Prof. Dr. Derviş KARABOĞA, Erciyes Üniversitesi, karaboga@erciyes.edu.tr

Prof. Dr. M. Tamer ŞENEL, Erciyes Üniversitesi, senel@erciyes.edu.tr

Prof. Dr. Doğan IŞIK, Erciyes Üniversitesi, dogani@erciyes.edu.tr

Prof. Dr. Burak UZAL, Abdullah Gül Üniversitesi, burak.uzal@agu.edu.tr

Prof. Dr. Niğmet UZAL, Abdullah Gül Üniversitesi, nigmet.uzal@agu.edu.tr

Prof. Dr. Nuray ATEŞ, Erciyes Üniversitesi, nuraya@erciyes.edu.tr
Prof. Dr. Murat GÖKÇEK, Ömer Halisdemir Üniversitesi, mgokcek@ohu.edu.tr
Prof. Dr. Ömer Galip SARAÇOĞLU, Erciyes Üniversitesi, saracog@erciyes.edu.tr
Prof. Dr. Semih YILMAZ, Erciyes Üniversitesi, semihyilmaz@erciyes.edu.tr
Doç. Dr. Ömer AYDIN, Erciyes Üniversitesi, omeraydin@erciyes.edu.tr
Doç. Dr. Emrah TIRAŞ, Erciyes Üniversitesi, emrahtiras@erciyes.edu.tr
Doç. Dr. Umut ÇALIŞKAN, Erciyes Üniversitesi, ucaliskan@erciyes.edu.tr
Dr. Öğr. Üyesi Erhan KARAKAYA, Yozgat Bozok Üniversitesi, erhan.karakaya@bozok.edu.tr



ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ
Erciyes University Journal of Institute of Science and Technology



ISSN: 1012-2354

Yayın Danışma Kurulu

Prof. Dr. Fatih ALTUN, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Ülkü YETİŞ, Ortadoğu Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Filiz B. DİLEK, Ortadoğu Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Gülçin BÜYÜKÖZKAN, Galatasaray Üniversitesi

Prof. Dr. Ceyda OĞUZ, Koç Üniversitesi

Prof. Dr. Yaman BARLAS, Boğaziçi Üniversitesi

Prof. Dr. Levent KANDİLLER, Yaşar Üniversitesi

Prof. Dr. Cengiz KAHRAMAN, İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Metin DAĞDEVİREN, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Cevriye Temel GENCER, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet TANYAŞ, Maltepe Üniversitesi

Prof. Dr. TUNCAY CANDAN, Ömer Halisdemir Üniversitesi

Prof. Dr. Li TONGXING, Linyi University

Prof. Dr. Panos M. PARDALOS, University of Florida

Prof. Dr. José Machado Minho, University

Prof. Dr. Petraq PAPAJOĞJİ, University of New York Tirana

Prof. Dr. Şahin YILDIRIM, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Derviş KARABOĞA, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Orhan BÜYÜKGÜNGÖR, Ondokuz Mayıs Üniversitesi



ERCİYES ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

Erciyes University Journal of Institute of Science and Technology

ISSN: 1012-2354



Cilt 40, Sayı 2, Hakem Kurulu

Prof. Dr. Zeliha LEBLEBİCİ, Nevşehir Hacı Bektaş Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa Serdar GENÇ, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Ali AKDAĞLI, Mersin Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet ERDOĞAN, Necmettin Erbakan Üniversitesi

Prof. Dr. Şener KARABULUT, Hacettepe Üniversitesi

Prof. Dr. Ertuğrul ŞAHMETLİOĞLU, Kayseri Üniversitesi

Prof. Dr. Durmuş DAĞHAN, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Prof. Dr. Recep KARA, Nevşehir Hacı Bektaş Üniversitesi

Prof. Dr. Çiğdem Alabaş USLU, Marmara Üniversitesi

Prof. Dr. Vecihi YİĞİT, Atatürk Üniversitesi

Prof. Dr. Murat UYSAL, Afyon Kocatepe Üniversitesi

Prof. Dr. Ercan KARAKÖSE, Kayseri Üniversitesi

Doç. Dr. Şenol KARTAL, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Doç. Dr. Bahatdin DAŞBAŞI, Kayseri Üniversitesi

Doç. Dr. Seyhan ORAN, Bursa Uludağ Üniversitesi

Doç. Dr. Vedat YILMAZ, Erciyes Üniversitesi

Doç. Dr. Tamer DİRİKGİL, Kayseri Üniversitesi

Doç. Dr. Murat OLUTAŞ, Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Doç. Dr. Dursun BALKAN, Türk Hava Kurumu Üniversitesi

Doç. Dr. Mustafa ZEYBEK, Selçuk Üniversitesi

Doç. Dr. Gökçe TANER, Bursa Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Mevlüt ŞAHİN, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Doç. Dr. Onur ÇAVUŞOĞLU, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Erkan YILMAZ, Erciyes Üniversitesi

Doç. Dr. Umut Çalışkan, Erciyes Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Lütfiye KARASAKA, Konya Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ukbe Usame UÇAR, Fırat Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Kübra KESER, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Habibe DURMAZ, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Adem Gölcük, Selçuk Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Aydan YELTİK, TOBB Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Fatih KİRAZ, Nuh Naci Yazgan Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Murat Çağlar BAYDOĞAN, Erciyes Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi İlknur Acar ATA, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet CANDAN, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Meltem KAÇIKOÇ, Süleyman Demirel Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Senem Teksoy BAŞARAN, İstanbul Medeniyet Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Kutalmış Recep AKÇA, Sakarya Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Nizar POLAT, Harran Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Hasan Bilgehan MAKİNECİ, Konya Teknik Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Abdullah VARLIK, Necmettin Erbakan Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Elif Burcu BALI, Gazi Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Nurullah ÖZTÜRK, Kayseri Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Özlem Karabiber CURA, İzmir Katip Çelebi Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Muhammet ÇELİK, Aksaray Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Sertaç Samed SEYİTOĞLU, Hitit Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Yüksel Tokur BOZKURT, Gaziantep Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Murat Emre ERKOÇ, Erciyes Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet YERLİKAYA, Selçuk Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Ümmü Gülsüm Söylemez, Muş Alparslan Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Yasin GÖRMEZ, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Pelin AKIN, Çankırı Karatekin Üniversitesi
Öğr. Gör. Dr. Ferhat ÇEÇEN, Süleyman Demirel Üniversitesi
Arş. Gör. Sümeyra Büşra ŞENGÜL, Selçuk Üniversitesi
Arş. Gör. Ali Emre GÖK, Nevşehir Hacı Bektaş Üniversitesi
Arş. Gör. Burak Kürşat GÜL, Erciyes Üniversitesi
Arş. Gör. Murat ŞAHİN, Celâl Bayar Üniversitesi

Cilt: 40 Sayı: 2

Ağustos 2024

İçindekiler

Sayfalar	Makaleler	Türü
167-180	Yer Kontrol Nokta (YKN) Sayısı ve Dağılımının Harita Üretim Hassasiyetine Etkisinin Araştırılması	Araştırma Makalesi
181-204	Boru Demetinde Kanat Şekli Boru Kullanımının Entropi Üretimi ve Alan Uyum Faktörü Yönünden Sayısal Olarak İncelenmesi	Araştırma Makalesi
205-215	Farklı Yönetmeliklerde Tanımlanan Etkin Kesit Rijitliklerinin Yapı Davranışına Etkisinin İncelenmesi	Araştırma Makalesi
216-233	A Multi-Dimensional Hydrogeochemical Assessment and Water Quality Analysis of Groundwater Resources in Yozgat Province	Araştırma Makalesi
234-253	Yerinde Yapısal Denetime Alternatif Olarak Dijital İkiz Kullanarak Otomatik Çatlak Tespiti ve WEB Tabanlı Sanal Gerçeklik ile Görselleştirme	Araştırma Makalesi
254-269	Determination of Johnson Cook Strength and Failure Parameters of EN-GJS-400 Spheroidal Graphite Cast Iron	Araştırma Makalesi
270-287	Ağırıklı CNN Topluluğu Tabanlı Kolorektal Kanser Tespiti	Araştırma Makalesi
288-303	Türkiye'de Tahıl Üretiminin Tahminlemesi: Karşılaştırmalı Analiz	Araştırma Makalesi
304-314	Studies on antioxidant, anticancer, DNA cleavage activity and GC-MS analysis of the ethanol extracts of Ecballium elaterium (L.) A. Rich., plant parts	Araştırma Makalesi
315-330	DNA Barcoding of Four Lichenized Fungi from Horseshoe Island (Antarctic Peninsula, Antarctica)	Araştırma Makalesi
331-337	Savunma Sektöründeki Sistemlerin Arızalar Arası Ortalama Süre Analizi	Araştırma Makalesi
338-360	Osmanlı'nın Son Dönemi Ardahan'da İnşa Edilen Camilerde Ekolojik Mimari Tasarım Ölçütlerinin Değerlendirilmesi	Araştırma Makalesi
361-371	Refractive Index Sensor and Cancer Cell Detection with Plasmonic-Based Three-Band Nearly Perfect Absorber	Araştırma Makalesi
372-382	Semiconducting Plant Extracts of Cucurbita Pepo L. Seeds for Facile, Inexpensive, Fully Solution-Processed, Transparent Photodetector Fabrication	Araştırma Makalesi
383-392	Benchmarking Deep Learning Models for Dermatological Image Analysis: EfficientNet Takes the Lead	Araştırma Makalesi
393-407	MIMO-FBMC/OQAM İletim Teknolojisi İçin Ayrık Karga Arama Algoritması Tabanlı Gelişmiş Bir Sembol Algılama Yöntemi	Araştırma Makalesi
408-419	Yüksek Hızlarda Doğrusal Katılaştırma Sonucu Zn-Al Ötektik Alaşımının Mikroyapı ve Mikrosertlik Özelliklerindeki Değişimlerin İncelenmesi	Araştırma Makalesi
420-428	Reklam İzlenimi Sırasında Fizyolojik Parametrelerin Analizine Dayalı Tüketici Tercihlerinin Sınıflandırılması	Araştırma Makalesi
429-449	Mathematical Modeling of Skin Cancer with the Effect of Stress	Araştırma Makalesi

Yer Kontrol Nokta (YKN) Sayısı ve Dağılımının Harita Üretim Hassasiyetine Etkisinin Araştırılması

Volkan İzci¹, Ali Ulvi^{2*}, Abdurahman Yasin Yiğit²

*¹ Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Uzaktan Algılama ve CBS Anabilim Dalı, MERSİN
² Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Harita Mühendisliği, MERSİN

(Alınış / Received: 07.05.2024, Kabul / Accepted: 01.08.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.08.2024)

Anahtar Kelimeler

YKN,
SfM,
Fotogrametri,
İHA fotogrametrisi,

Öz: Bu çalışma, İHA fotogrametrisi kullanılarak harita üretiminde YKN sayısı ve dağılımının doğruluk üzerindeki etkilerini incelemektedir. Çalışmada, dört farklı YKN dağılım senaryosu (kenar, merkez, homojen ve köşegen) değerlendirilmiştir. Her bir senaryoda YKN sayısının 4'ten 40'a kadar değiştiği toplam 52 alt senaryo uygulanmıştır. SfM algoritması kullanılarak üretilen ortofoto ve SYM doğruluğu, GNSS Cors yöntemi ile ölçülen 30 yer kontrol noktası kullanılarak analiz edilmiştir. Doğruluk değerlendirmesinde RMSE_{xy} ve RMSE_z değerleri hesaplanmış ve YKN sayısı ile dağılımının planimetrik (xy) ve yükseklik (z) doğruluğuna etkileri incelenmiştir. Elde edilen bulgular, en iyi planimetrik doğruluğun kenar ve homojen dağılımlarla sağlandığını, en düşük RMSE_{xy} değerinin 3.2 cm ile kenar dağılımda ve 4.0 cm ile homojen dağılımda elde edildiğini göstermektedir. Yükseklik doğruluğunda ise en düşük RMSE_z değeri 4.0 cm ile homojen dağılımda ve 4.7 cm ile kenar dağılımda tespit edilmiştir. Merkezi dağılım senaryolarında doğruluk oranlarının diğer senaryolara göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmanın bulguları, YKN sayısının artırılmasının doğruluk oranlarını artırdığını, ancak belirli bir noktadan sonra bu artışın sınırlı kaldığını ortaya koymaktadır. Özellikle 24-30 YKN aralığında hata oranlarının durağan hale geldiği tespit edilmiştir.

Investigation of the Effect of the Number and Distribution of Ground Control Point (GCP) on Map Production Accuracy

Keywords

GCP,
SfM,
Photogrammetry,
UAV Photogrammetry

Abstract: This study examines the impact of varying the number and distribution of GCPs on the precision of map production via UAV photogrammetry. In the study four distinct GCP distribution scenarios were evaluated. In each scenario, a total of 52 sub-scenarios were applied, with the number of GCPs varying from 4 to 40. The accuracy of the orthophoto and DSM produced using the SfM algorithm was evaluated through the analysis of 30 check points, which were measured using the GNSS cors method. To assess the accuracy, the RMSE_{xy} and RMSE_z values were calculated. Furthermore, the impact of the number and distribution of the GCPs on the planimetric (xy) and elevation (z) accuracy was analyzed. The findings indicate that the optimal planimetric precision is attained with edge and homogeneous distributions. The lowest RMSE_{xy} value was observed to be 3.2 cm with edge distribution and 4.0 cm with homogeneous distribution. About the accuracy of the elevation data, the lowest RMSE_z value was observed for the homogeneous distribution, at 4.0 cm, while the lowest value for the edge distribution was 4.7 cm. It was observed that the accuracy rates were lower in the central distribution scenarios in comparison to the other scenarios. The findings of the study indicate that an increase in the number of GCPs results in enhanced accuracy rates; however, this improvement is observed to plateau at a certain point. Within the range of 24-30 GCPs, the error rates were observed to reach a point of stabilization.

*İlgili Yazar, email: aliulvi@mersin.edu.tr

1. Giriş

Ortofotolar ve sayısal yüzey modelleri (SYM) dahil olmak üzere yüksek çözünürlüklü topografik verilerin erişilebilirliği, topografik özelliklerin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını gerektiren çok sayıda mühendislik disiplini için giderek daha önemli hale gelmektedir [1]. Topografik haritaları oluşturmak için fotoğrafların kullanılması ile fotografik görüntülerin analizi ve ölçülmesi yoluyla coğrafi bilgi elde etme süreci olan fotogrametri yöntemi de kullanılmaya başlanılmıştır [2, 3]. Fotogrametrik yöntemin sürekli gelişmesi ve çeşitlenmesiyle ürün üretiminde süre, maliyet ve doğruluğun hassasiyeti bakımından önemli bir avantaj sağlanmıştır. Klasik hava fotogrametrisinde, başta hava kameraları olmak üzere kullanılan ekipmanlar açısından, ürün meydana gelinceye kadarki süreç oldukça maliyetlidir [3, 4].

Harita üretiminde her ne kadar zaman ve maliyet çok önemli kriter olsa da konum doğruluğu hepsinden önemlidir. İHA fotogrametrisinde de konum doğruluğunu olumlu ya da olumsuz etkileyen bazı etkenler bulunmaktadır. Yer kontrol noktası (YKN) sayısı ve dağılımı, uçuş yapılacak yükseklik, yer örnekleme aralığı (YÖA), meteorolojik koşullar ve kamera özellikleri bu etkenlerin başında gelmektedir [2-5]. İnsansız hava araçları (İHA'lar), geleneksel hava ve uydu sensörlerine kıyasla daha düşük maliyetleri, yüksek zamansal ve mekânsal çözünürlükleri ve görüntü alımındaki esneklikleri nedeniyle uygun bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır [6-8]. İHA'lardan elde edilen görüntülerin işlenmesine yönelik mevcut yazılım uygulamalarının çoğu hareket tabanlı yapısal algılama (Structure from Motion/SfM) yaklaşımına dayanmaktadır [9-11]. Bu yaklaşım, herhangi bir kontrol noktasına ihtiyaç duymadan kolinearite denklemlerini çözmesi ve böylece keyfi bir koordinat sisteminde seyrek nokta bulutu ve tam bir kamera kalibrasyonu sağlamasıyla geleneksel dijital fotogrametriden farklıdır [11, 12]. Bu, görüntü özelliklerinin korelasyonu, benzerliği ve tekdüzeliğinin analizi yoluyla "anahtar noktalar" olarak adlandırılan benzer görüntü öğelerini otomatik olarak tanımlayan görüntü eşleştirme algoritmaları ile mümkün olmaktadır [13]. SfM, yoğun bir nokta bulutu elde etmek için eşleşen anahtar noktaların seyrek kümesini genişletmek için yinelemeli bir süreç kullanan çoklu görüntü stereo (Multi View Stereo/MVS) algoritmaları ile birleştirilir. YKN'ler, görüntülerin düzeltilmesi sırasında hem fotogrametride hem de uzaktan algılamada görüntü koordinat sistemi ile yer koordinat sistemi arasındaki bağlantıyı sağlar. Bu amaçla görüntülerin çekildiği kameraların kalibrasyon bilgilerinden ve YKN'lerden yararlanır [9, 10, 12]. Bu YKN'ler kalıcı yer özellikleri veya uçuştan önce araştırılacak alana dağıtılmış referans hedefler olabilir. Bu noktaların ham görüntülerde doğru bir şekilde konumlandırılması ve tanımlanması çok önemlidir [4-7]. Üretilen harita veya yükseklik modellerinin gerçek dünya koordinat sistemi ile uyumlu hale getirilmesini ifade eden coğrafi referanslama veya coğrafi konumlandırma işlemi tamamlamak için en az üç YKN gereklidir [9-12, 17]. Ancak, elde edilen fotogrametrik ürünlerin hassasiyetini artırmak için daha fazla sayıda YKN kullanılması şiddetle teşvik edilmektedir [11-13]. YKN kullanımının fotogrametrik ürünlerin doğruluğunu doğrudan etkilediği göz önüne alındığında, yıllar içerisinde birçok araştırmacı YKN sayısını değiştirerek İHA görüntülerinden elde edilen ürünlerin doğruluğunu değerlendirmek için çeşitli çalışmalar gerçekleştirmişlerdir.

Erdoğan ve Mutluoğlu [14], nokta konum doğruluğunu DJI Phantom 3 Pro ile çekilen fotoğraflardan nokta bulutu ve ortofoto üretirek araştırmışlardır. Çalışma alanında İHA kullanılarak 50m ve 80m yüksekliklerden %70-%80 oranında bindirmeli görüntüler elde edilmiştir. Görüntüler fotogrametrik olarak değerlendirilmiş, sonuçta elde edilen noktaların konum değerleri ile, RTK-GPS ölçme tekniğiyle elde edilmiş olan nokta konum değerlerini karşılaştırmışlardır. Kurban ve arkadaşları [15], standartlara uygun döner kanatlı, konumlandırma sistemli ve oto pilot destekli bir hava aracı kullanarak (600m x 800m) çalışma alanının 100m irtifadan bindirmeli olarak yüksek çözünürlüklü görüntüsünü almışlardır. Görüntüler SfM algoritması ile fotogrametrik olarak işlenmiş ve çalışma alanının çok yüksek konumsal çözünürlüğü olan ortofoto ve sayısal arazi modeli (SAM) verisi oluşturulmuştur. Yapılan kontrollerin sonucunda, oluşturulan ortofotoya ait 2B konumsal doğruluk 6cm ve SAM verisinin yüksekliğine ait doğruluk ise 8cm mertebesinde olduğu gösterilmiştir. Agüera-Vega ve arkadaşları [16] uçuş yüksekliğinin, arazi morfolojisinin ve YKN sayısının bir SYM ve ortofoto doğruluğu üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmaları için, beş arazi morfolojisi, dört uçuş yüksekliği (50, 80, 100 ve 120 m) ve üç farklı YKN'yi (3, 5 ve 10) hesaba katan 60 fotogrametrik proje yürütmüşlerdir. Uçuş yüksekliği ve YKN sayısının en doğru kombinasyonunun sırasıyla 50 m ve 10 YKN olduğunu bulmuşlardır. Çalışmanın sonunda, RMSE değerleri x,y,z için sırasıyla 0.038, 0.035, 0.049 m olarak bulunmuştur.

Özcan [18], İHA kullanılarak yapılan çalışmada farklı yüksekliklerden ile alınan hava görüntülerin ve elde edilen SYM'nin konum doğruluklarının bulunması amaçlamıştır. Yer kontrol noktalarının koordinatları DGPS ile belirlenerek konumsal doğrulama için kullanılmıştır. Çalışmada ayrıca üretilen yoğun nokta bulutlarının doğrulukları arazi ölçmeleri ile karşılaştırılmıştır. Düşeyde İHA ve DGPS ile yapılan ölçümlerde ortalama olarak santimetre seviyesindeki fark dikkat çekmektedir. Yüzeydeki ani değişimlerin olduğu bölgelerde ise daha büyük değerler olduğu gözlenmiştir. Öztürk ve arkadaşları [19], çalışma alanının ortofotolarını üretebilmek için 60m,

80m ve 100m olarak farklı yüksekliklerde uçuşlar gerçekleştirmişler ve 60m ve 80m yükseklik için 90°, 100m yükseklik için 45°, 60° ve 90° olmak üzere farklı kamera açıları kullanarak yüksek çözünürlüklü görüntüler elde etmişlerdir. Sonrasında çalışma alanında önceden jeodezik yöntemle tesis etmiş oldukları 5 yer kontrol noktası ile ortofotoların doğruluklarını kontrol etmişlerdir. Martinez-Carricondo ve arkadaşları [20], İHA fotogrametrisi sonucu ortaya çıkan ürünlerin doğruluğunu etkileyen birçok faktör olduğu ve YKN sayısının ve çalışma alanındaki dağılımının etkisinin özellikle önemli olduğunu vurgulayarak, çalışmalarında İHA fotogrametrisi ile elde edilen ürünleri optimize etmeye çalışmak için farklı YKN dağılımları incelemiştir. Test edilen tüm dağılımlar arasında en iyi sonuçlar kenar dağılımı ve tabakalı dağılım ile elde edildiği sonucuna varmışlardır. Oniga ve arkadaşları [21], yüksek hassasiyetli sonuçlar elde etmek için kaç yer kontrol noktasının gerekli olduğu sorusuna cevap bulmayı amaçlamışlardır. Sonuçları elde etmek için, yaklaşık 1 hektarlık bir alan düşük maliyetli bir İHA ile yerden 28 m ve 35 m olmak üzere iki farklı yükseklikten hava fotoğrafları çekilmiştir. Nihai ürünlerde yüksek doğruluk elde etmek için 1 YKN/200 m²'lik bir yoğunluğun gerekli olduğu sonucuna varmışlardır. Ferrer-Gonzalez ve arkadaşları [22] çalışmalarını, YKN sayısının ve dağılımının koridor şeklindeki bir çalışma sahasında İHA fotogrametri projelerinin doğruluğunu nasıl etkilediğini değerlendirmek için yapmıştır. Bu amaçla, 2,1 km'lik bir yol üzerinde farklı konfigürasyonlara sahip birkaç proje gerçekleştirilmiş ve YKN olarak kullanılmak üzere 47 nokta ölçülmüştür. Doğruluğu değerlendirmek için, referanslama sürecinden elde edilen Karesel Ortalama Hata (Root Mean Squared Error/RMSE) değerleri kullanılmıştır. İncelenen tüm dağılımlar için, YKN sayısındaki artışla birlikte yatayda ve düşeyde doğruluk artmış ve planimetrik (yatay) doğruluk her zaman dikey doğruluktan daha iyi olduğunu belirtmişlerdir.

Ayrıca, Martínez-Carricondo ve arkadaşları [23], 22 hektarlık bir yüzeyde İHA fotogrametrisi ile elde edilen ürünlerin kalitesi üzerinde YKN'lerin değişen sayı ve dağılımlarının etkisi araştırılmıştır. Bulgular, çalışma alanı çevresinde yer alan YKN'lerin bu alan içinde tabakalı bir dağılımla birleştirilmesiyle daha hassas sonuçlar elde edildiğini göstermiştir. Tahar [24], YKN sayısı ve dağılımının 150 hektarlık bir alanın SYM ve ortofotosunun hassasiyeti üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yukarıda bahsedilen çalışmalarda benzer sonuçlara ulaşılmış ve en uygun YKN oranı olarak 0,5 ila 1 YKN ha⁻¹ konsantrasyonu önerilmiştir. Reshetyuk ve Mårtensson [25], 2,73 hektarlık bir alana dağıtılan farklı YKN konfigürasyonlarının İHA fotogrametri çıktılarının hassasiyeti üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Optimum konsantrasyon, tüm yüzey boyunca eşit olarak dağıtılan hektar başına 1,8 YKN olarak belirlenmiştir. Sanz-Ablanado ve arkadaşları [26] tarafından, kabaca kare şeklinde olan 1225 hektarlık bir kömür madeni bölgesinde YKN'lerin sayısının ve konumlandırılmasının etkisini belirlemek için kapsamlı bir çalışma yürütülmüştür. Çalışmaya 3465 farklı kombinasyon dahil edilmiştir. Sonuçlar, YKN sayısı arttıkça doğruluğun ne ölçüde iyileştiğinin YKN'lerin konumuna bağlı olduğunu göstermektedir. James ve Robson [27], 50 × 3 m boyutlarındaki bir kıyı uçurumunun erozyonunu incelemek için SfM ve MVS tekniklerini kullanmışlardır. Ölçek referanslama amacıyla 8 YKN kullanmışlar, ancak YKN sayısının veya dağılımının SYM doğruluğu üzerindeki etkisini araştırmamışlardır. Ayrıca, yazarlar doğruluğu değerlendirmek ve YKN'lerin potansiyel etkisini tespit etmek için kontrol noktaları (KN) kullanmamışlardır. Bu yaklaşım, doğruluğu tahmin etmek ya da YKN sayısından etkilenip etkilenmediğini belirlemek için uygun değildir.

Yukarıda bahsedilen çalışmalar, İHA fotogrametrisi yoluyla elde edilen SYM ve ortofotoların doğruluğunun, kullanılan YKN sayısına ve bunların çalışma alanı boyunca dağılımına bağlı olduğu konusunda hemfikirdir. Ayrıca, optimum bir şekilde dağıtılmaları koşuluyla, YKN sayısı arttıkça elde edilen modelin doğruluğu da artmaktadır. Bununla birlikte, kullanılabilir YKN sayısında bir sınır vardır ve bunun ötesinde doğrulukta daha fazla gelişme sağlanamaz. Ayrıca, saha çalışmasıyla ilgili maliyetlerin kullanılan YKN sayısı ile arttığı göz önüne alındığında, istenen doğruluk düzeyini minimum saha çalışması maliyetiyle dengelemek gerekir. Fakat çalışmalara bakıldığında birçoğunun gayri meskûn sahalarda veya boş kullanılan arazilerde yapıldığı görülmektedir. Her ne kadar üretilen haritaların doğruluğunu etkileyen parametreler yukarıda detaylı olarak verilse de kentsel alanlardaki çevresel ve fiziksel etkenler de doğruluğu etkilemektedir. Bu yüzden bu çalışmanın amacı, meskûn bir alanda fotogrametrik projede doğruluk ve saha çalışması arasındaki dengeyi optimize eden YKN sayısını ve dağılımını belirlemektir. Bu amaca ulaşmak için, 722 saha üzerinde bir İHA fotogrametri projesi yürütülmüştür. 40 noktanın koordinatları GNSS alıcısı kullanılarak bir santimetre hassasiyetle ölçülmüştür. Her biri farklı sayıda ve dağılımda YKN içeren toplam 4 senaryo geliştirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

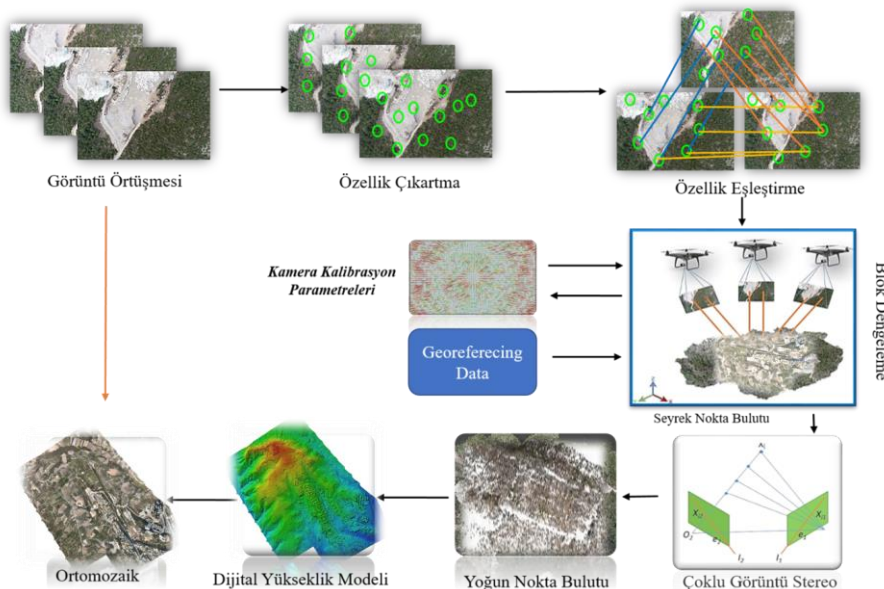
Çalışmanın bu bölümünde ilk olarak dijital çıktılarının oluşturulduğu SfM algoritması ile fotogrametrik süreç hakkında bilgiler verilecektir. Daha sonra çalışma alanı, kullanılan donanımlar, YKN ve KN dağılımı ve verilerin işlenmesi, uçuş planlaması verilmiştir.

2.1. Structure-from-Motion (SfM) Fotogrametri

Uzun yıllardır kullanılan fotogrametri tekniği temelde fotoğraf çekim konumuna göre hava fotogrametrisi ve yersel fotogrametri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır [24, 28-]. Hava fotogrametrisi genellikle çok büyük alanların topografik haritalarının yapılması için tercih edilirken yersel fotogrametri daha çok objelerin 3B modellenmesi üzerine kullanılmaktadır. Zaman içerisinde hava fotogrametrisi ve yersel fotogrametri yönteminin boşluklarını doldurmak için farklı alternatif veri toplama teknikleri araştırılmaya yönelim olmuştur [28-30]. Bu yönelme özellikle zaman ve maliyet konusunda avantaj sağlayan İHA'ların fotogrametriye adaptasyon sürecini hızlandırmıştır. Buna bağlı olarak İHA fotogrametrisi literatürde yer almaya başlamıştır [30-32]. İHA fotogrametrisi, genel olarak içerisinde herhangi bir insan taşımadan otonom veya manuel olarak kontrol edilebilen bir hava aracına entegre edilen kamera ile çekilmiş fotoğraflar kullanılarak yapılan fotogrametrik sürecin genel tanımıdır [28]. Bu bağlamda İHA fotogrametrisi ile özellikle yeni gelişen fotoğraf işleme teknikleri birçok disiplin tarafından farklı çalışmalarının gözdesi haline gelmiştir ([32, 33]. Gelişen veri toplama yöntemlerinin yanından dijitalleşme ile birçok fotogrametrik yazılımlarda kullanılmaya başlanılan SfM gibi özel algoritmalar İHA'lardan elde edilen fotoğrafların fotogrametride kullanılmasında hızlı pratik ve yüksek hassasiyette sonuçlar alınmasında önemli katkılar sağlamıştır.

SfM, fotoğrafların kamera parametrelerini, pozisyonları ve görüntülerdeki nesnenin üç boyutlu (3B) geometrilerinin otomatik olarak düzenlenmesini sağlayarak 3B model oluşturulmasını mümkün kılan görüntü temelli bir modelleme tekniğidir [29]. Geleneksel fotogrametri teknikleri, geometrik model oluşturabilmek için kamera ile YKN hassasiyeti yüksek 3B konum ve yönlendirme bilgilerine ihtiyaç duyar. [32] Oysa hareket tabanlı yapısal algılama yönteminde model geometrisi, kamera pozisyonu ve yönlendirme bilgisi aynı anda ve otomatik olarak çözülmektedir [32]. Üç boyutlu uzayda bir noktanın kesin konumunun belirlenmesi için gerekli hesaplamaların tam otomatik yapılması ve kameraların hassas bir şekilde konumlandırılmasına duyulan ihtiyacın ortadan kalkması [28, 32] geleneksel stereoskopik fotogrametri ile SfM yöntemi arasındaki temel fark olarak söylenebilir.

SfM algoritmasının kullanılması ile geleneksel kameralarla çekilen fotoğraflardan 3B modellerin oluşturulması ve yüzeylerin yeniden yapılandırılması önemli ölçüde basitleşmiştir [34]. Algoritma, üst üste binen görüntülerdeki standart özellikleri tanımlayıp hizalayarak 3B yapılar oluşturmaktadır. SfM algoritması, stereoskopik fotogrametride kullanılanlara benzer fikirlere dayansa da [35] 3B uzaydaki noktaların kesin koordinatlarının hesaplanmasını otomatikleştirerek stereoskopik fotogrametriden ayrılır. Stereoskopik fotogrametrisinin aksine, SfM algoritması için mükemmel bir kamera kurulumuna gerek yoktur [32, 35]. SfM algoritması kullanan yazılımlar, çok sayıda fotoğraftan ortak noktaları otomatik olarak çıkararak ve seyrek bir nokta bulutu oluşturan yöntemler üzerine kuruludur [37]. Radyometrik piksel değerlerini kullanan ölçekten bağımsız özellik dönüşüm (Scale Invariant Feature Transform/SIFT) algoritması, bu işlem için birincil algoritma olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [38, 39]. SfM sürecinde ilk olarak üretilen seyrek nokta bulutunda sonra ek bir aşama olarak yoğun nokta bulutu oluşturulur. Bu aşamada yoğun çoklu görüntü stereo (Dense Multi View Stereo/DMVS) tekniği uygulanmaktadır [40]. Burada, haritalanan pikseller ve bunlara karşılık gelen 3B koordinatlar nokta bulutlarına dönüştürülür. Daha sonra, bu nokta bulutları bir ağ modeli oluşturmak için kullanılır. Perry vd. [41] göre, fotoğraflar modele özgün bir doku kazandırır. Son olarak isteğe bağlı olarak yüksek çözünürlüklü ortofoto ve yükseklik haritaları üretilir. SfM algoritması genel iş akışı Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. SfM İşlem Adımları ([45]'ten dizayn edilmiştir).

2.2. Materyal

Çalışmada hava fotoğraflarının çekilmesi için Matrice 300 RTK İHA kullanılmıştır. DJI Matrice 300 RTK, Temmuz 2021'de piyasaya sürülen dört eksenli bir İHA platformudur. Üreticinin özelliklerine göre platformun net ağırlığı 8,37 kg ve boyutları 810 × 670 × 430 mm (U × G × Y) ve pil ömrü 55 dakikadır. Üreticinin özelliklerine göre platformun net ağırlığı 8,37 kg ve boyutları 810 × 670 × 430 mm'dir (U × G × Y). İHA, GPS Navstar, Glonass, BeiDOU ve Galileo sistemleriyle uyumlu bir GNSS RTK alıcısıyla donatılmıştır. İki GNSS RTK anteni kanatlara yerleştirilmiştir ve İHA'nın konumu sanal referans istasyonlarının kullanımıyla belirlenir. DJI MATRICE 300 RTK, D-RTK modunda $\pm 0,1$ m'lik dikey ve yatay gezinme doğruluğuna (rüzgârsız veya esintili) sahiptir [42]. Çalışmada kullanılan İHA Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Matrice 300 RTK Görseli [43]

İHA, Zenmuse P1 drone kamerası 3 eksenli stabilize bir gimbal üzerinde değiştirilebilir sabit odaklı lensler ile tam çerçeve sensörü entegre eden bir cihazdır. Aynı zamanda fotogrametri uçuş görevleri adına tasarlanmış olup performansı ve doğruluğu çok yeni bir düzeye taşımaktadır. P1, uçuş esnasında her 0.7 saniyede bir fotoğraf çekebilen ve tek bir uçuşta 3 km² kapsayan tam çerçeve, az gürültülü yüksek hassasiyetli bir sensör içermektedir. Kullanılan İHA'nın fotogrametrik amaçlı son teknoloji donanımları kullanılması çalışmada İHA seçiminde etkilemiştir.

YKN ve KN'lerin ölçülmesi ve koordinatlandırılması işleminde TOPCON SR GNSS kullanılmıştır (Şekil 3). Kullanılan GNSS alıcısının Tablo 1'de konumsal doğruluk değerleri verilmiştir.

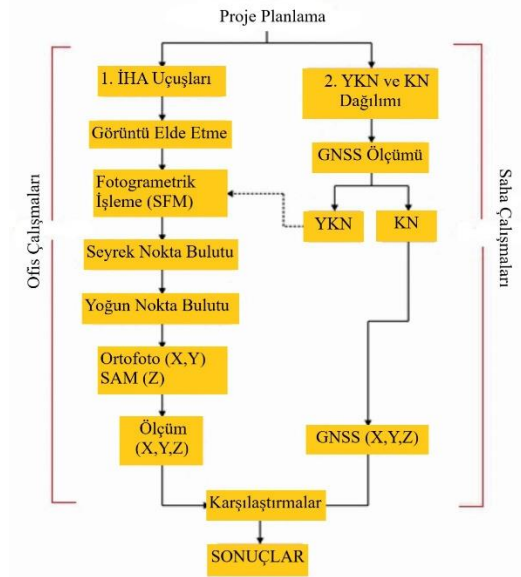


Şekil 3. Topcon SR GNSS alıcısı [44]

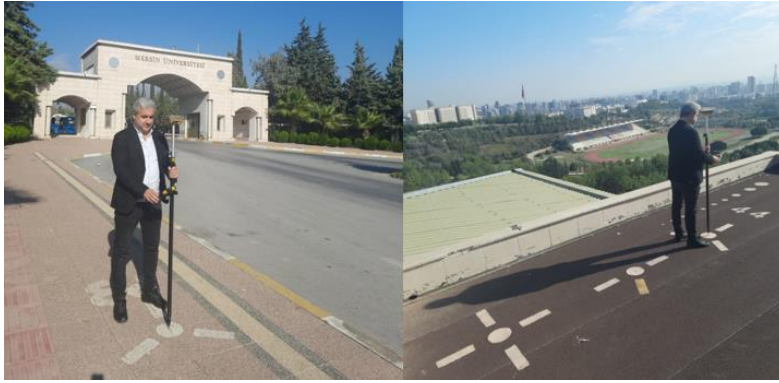
Tablo 1. Topcon SR GNSS konum doğruluk kriterleri

Özellik	Değer
RTK (L1 + L2)	H: 10 mm + 1.0 ppm V: 15 mm + 1.0 ppm
Hızlı Statik (L1 + L2)	H: 3 mm + 0.5 ppm V: 5 mm + 0.5 ppm
DGPS	H: 0.4 m, V: 0.6 m
SBAS	H: 1.0 m, V: 1.5 m

Çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada YKN ve KN'lerin araziye tesis edilmesi, ölçümleri ve uçuş operasyonlarından oluşan saha çalışması. İkinci aşama olarak ise ofis çalışmalarında uçuş görüntülerinin bilgisayara aktarılarak fotogrametrik yazılımla işlenmesi, nokta bulutu oluşturulması, ortofoto ve yükseklik haritalarının üretilmesi işlemleri gerçekleştirilerek analizlerinin yapılmasıdır. Araziye ölçülen KN koordinatları kullanılarak doğruluk analizi ve karşılaştırılması ile çalışma sonlandırılmıştır (Şekil 4). Çalışma alanına tesis edilmiş olan 40 adet YKN ve 30 adet KN, Topcon Hiper SR cihazı kullanılarak GNSS CORS yöntemi ile ölçümleri yapılmıştır (Şekil 5). Uçuş öncesi uçuş planı hazırlanmış ve DJI Matrice 300 RTK İHA'ya DJI Zenmuse P1 kamera monte edilmiştir. Gölge alanlarından kaçınmak için öğle saatlerinde ve rüzgâr etkisinden kaçınmak için elverişli bir günde uçuş gerçekleştirilmiştir. Çalışmamız da YKN sayısı ve dağılımını test etmek istediğimiz için uçuş yüksekliği değiştirilmemiştir.



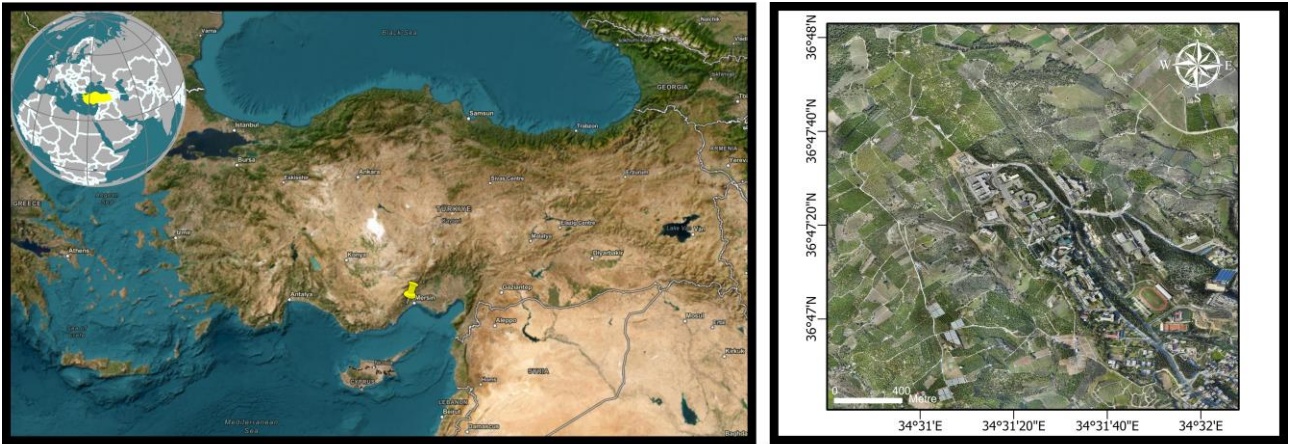
Şekil 4. Yapılan çalışmanın metodolojisi ([4]'ten dizayn edilmiştir)



Şekil 5. YKN çalışma alanına tesisi ve ölçülmesi.

2.3. Çalışma alanı ve YKN/KN Dağılımı

Mersin Üniversitesi Çiftlikköy Kampüsü çalışma alanı olarak seçilmiştir (Şekil 6). Mersin merkez ilçelerinden Yenişehir İlçesi sınırları içerisinde olan Çiftlikköy kampüsü Mersin Üniversitesinin merkez kampüsü olup, yaklaşık 722 ha yüz ölçüme sahiptir.



Şekil 6. Mersin Üniversitesi Kampüsü genel görünümü.

YKN'lerin çalışma alanındaki dağılımında dört senaryo ile test edilmiştir. Her senaryo için tüm YKN ve KN'ler kullanılmıştır. Senaryoların tamamında Şekil 9'da gösterilen KN'ler analiz için kullanılmış olup dengelemede kullanılmamıştır. Yöntemimiz daha net anlaşılması için her senaryo ayrı ayrı anlatılacaktır.

Senaryo 1: İlk senaryo, çalışma alanının kenarlarına yerleştirilen YKN'lerin, merkez alanına yerleştirilen YKN'ler ile desteklenmesidir (Şekil 7 sol).

Senaryo 2: İkinci senaryo, çalışma alanının merkezine yerleştirilen YKN'lerin, çalışma alanının kenarlarına yerleştirilen YKN'ler ile desteklenmesidir (Şekil 7 sağ).

Senaryo 3: Üçüncü senaryo, YKN'lerin çalışma alanına homojen olarak yerleştirilmesidir (Şekil 8 sol).

Senaryo 4: Dördüncü senaryo ise köşeden merkeze çapraz dağılımdır (Şekil 8 sağ).

İlk senaryo için öncelikle 30 adet YKN çalışma alanı çevresine homojen bir şekilde dağıtılmıştır. Fakat kenarlara yapılan bu dağıtım bir bütün olarak değil kademeleri olarak gerçekleştirilmiştir. Kenarlara YKN'lerin eklenmesi sonucunda 8 adet alt senaryo oluşturulmuştur. Daha net bir ifade ile çalışma alanının etrafında sırasıyla 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 30 adet YKN kullanılmıştır. Daha sonra geriye kalan 10 YKN ise merkez alana ikişer artırarak desteklenmiştir. Toplamda ilk senaryo için 13 alt senaryo oluşturulmuştur.

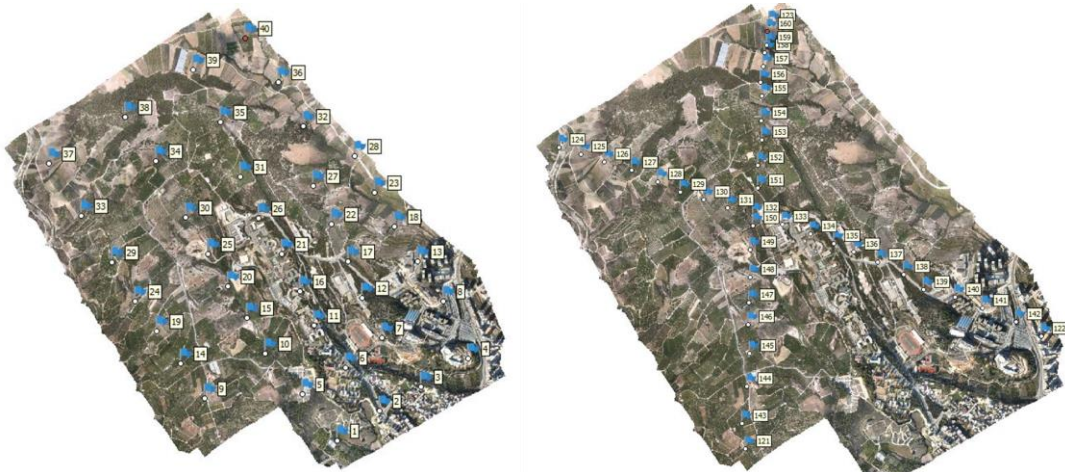
İkinci senaryo için çalışma alanının merkezine 30 adet YKN homojen bir şekilde, kenarlarına ise 10 adet YKN yerleştirilmiştir. Bu senaryo için tasarım ilk senaryonun tam tersidir. Yani 30 adet YKN merkeze kademeli olarak dağıtılmıştır. Daha sonra geriye kalan 10 YKN ikişer artırarak kenarlara yerleştirilmiştir. İkinci senaryo için de 13 alt senaryo oluşturulmuştur.

Üçüncü senaryo için 40 adet YKN çalışma alanına homojen bir şekilde dağıtılmıştır. Bu senaryoda ise ilk olarak 4 YKN ile süreç başlatıldı. Daha sonra ilk iki senaryo gibi artırım işlemi otuz YKN'ye kadar devam etmiştir. Bu YKN sayısından sonra diğer ilk iki senaryo ile uyumlu olması açısından kalan 10 YKN ikişer artırarak senaryo gerçekleştirilmiştir olup toplam 13 alt senaryo sağlanmıştır.

Dördüncü senaryo için ilk olarak arazinin köşegenlerine birer tane olmak üzere 4 YKN yerleştirilmiştir. Ardında her köşegenden başlanarak içeriye (merkeze doğru) dörder YKN artımı sağlanarak 30 YKN ilk iki senaryo gibi yerleştirilmiştir. Geriye kalan 10 YKN ise ikişerli olarak artırımı gerçekleştirilmiş ve bu senaryo içinde toplam 13 alt senaryo sağlanmıştır.



Şekil 7. Senaryo 1 (sol) ve senaryo 2 (sağ) için YKN dağılımı.



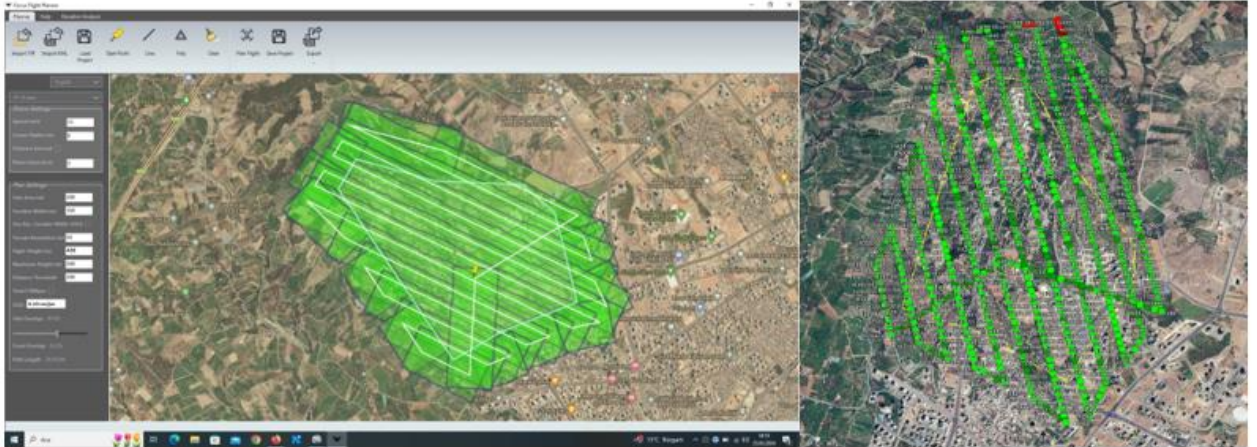
Şekil 8. Senaryo 3 (sol) ve senaryo 4 (sağ) için YKN dağılımı.



Şekil 9. Doğruluk analizi için kullanılan KN dağılımı.

2.4. Uçuş Planlama ve Verilerin İşlenmesi

Çalışma alanının büyüklüğü (722 ha) dikkate alınarak uçuş 5,13 cm/piksel Yer Örnekleme Aralığı (YÖA) olarak planlanmıştır. Uçuş yüksekliği YÖA' ya göre 428 m irtifaya denk gelmektedir. Arazinin büyük olmasından dolayı toplam 5 uçuş gerçekleştirilmiştir. Tüm uçuşlarda boyuna ve enine bindirme oranları sırasıyla %80 ve %60 olarak seçilmiştir. Her uçuş yaklaşık 30 dakika sürmüştür (Şekil 10). Yapılan tüm uçuşlar sonucunda 878 fotoğraf çekilmiştir. Uçuşlara ait bilgiler Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 10. Uçuş planlaması (sol) ve fotoğraf çekim noktaları (sağ).

Tablo 2. Uçuş bilgileri.

Uçuş Numarası	Fotoğraf Sayısı	YÖA (pix/cm)	Uçuş Yüksekliği (m)	Bindirme Oranı (boyuna/enine) %
1	30	5.13	428	80/60
2	31	5.13	428	80/60
3	317	5.13	428	80/60
4	315	5.13	428	80/60
5	185	5.13	428	80/60

2.5. Doğruluk Analizi

Çalışma alanında belirlenen 30 KN koordinatları (X, Y ve Z) GNSS Cors yöntemi ile ölçülmüştür. Bu koordinatlar referans koordinatları olarak kabul edilmiştir. Doğruluk analizinde oluşturulan dijital haritalarının konumsal, geometrik ve yükseklik hassasiyeti incelenmiştir. Bu analiz, çıktılarının koordinatlarının KN'ye göre doğruluğunun değerlendirilmesini kapsamaktadır. Referans veriler dijital çıktılarının koordinatlarıyla karşılaştırılır ve herhangi bir tutarsızlık hata olarak hesaplanır. Her çalışma için aynı sayıda KN doğruluk analizinde kullanılmıştır. Referans veri ile dijital çıktı haritalarından elde edilen veri arasındaki fark, model konumunun referans noktasından ne kadar uzakta olduğunu göstermektedir. Bu hatayı ölçmek için Karesel Ortalama Hata (Root Mean Squared Error/RMSE) hesaplanmıştır. RMSE değerini hesaplamak için X ve Y için Denklem 1 ve Z için Denklem 2 kullanılmıştır.

$$RMSE_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_0, Y_0 - X, Y_{GNSS})^2}{n} \quad (1)$$

$$RMSE_z = \frac{\sum_{i=1}^n (Z_0 - Z_{GNSS})^2}{n} \quad (2)$$

Bu denklemlerde

n, her proje için test edilen KN'lerin sayısıdır.

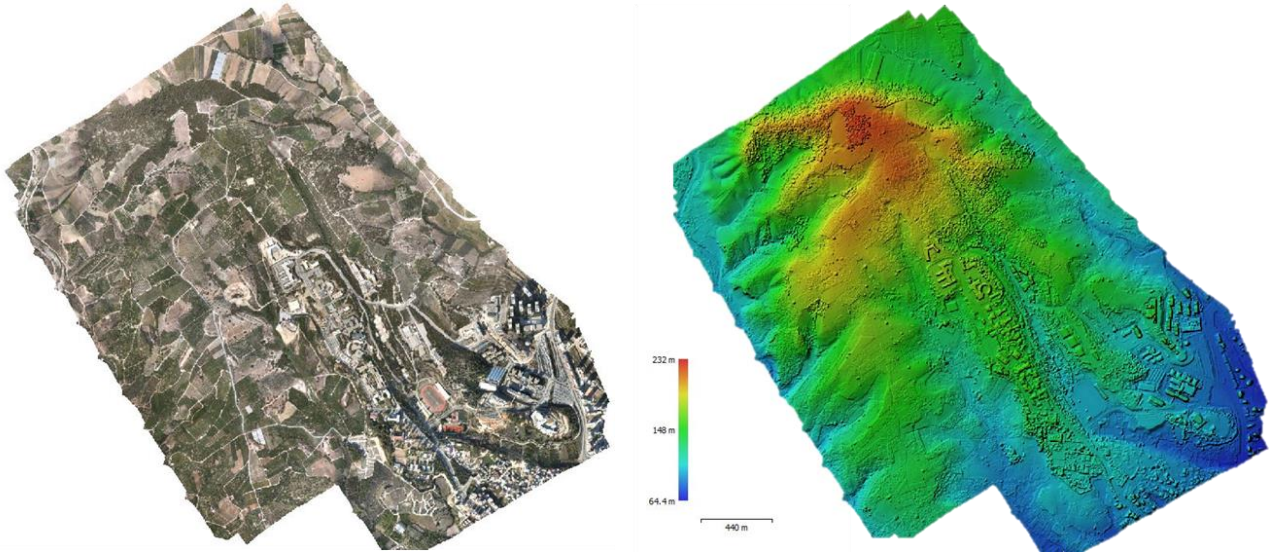
X_0 ve Y_0 sırasıyla x ve y ortofoto koordinatlarıdır.

X_{GNSS} ve Y_{GNSS} x ve y için GNSS Cors koordinatlarıdır.

Z_0 , yükseklik haritasından elde edilen i'nci KN üzerindeki yükseklik verisidir.

3. Bulgular ve Tartışma

Çalışmada fotogrametrik ürünlerin üretimi SfM algoritması ile çalışan Agisoft Metashape yazılımında gerçekleştirilmiştir. Senaryoların tamamı için hizalama işleminde parametreler aynı seçilmiştir. Tüm süreçte en yüksek parametreler ayarlanmıştır. Fotogrametrik süreç sonucunda alana ait üretilen örnek ortofoto ve yükseklik haritası Şekil 11'de verilmiştir. Tüm senaryolar için doğruluk analizleri Tablo 3 ve 4'te verilmiştir. Ayrıca bu senaryoların sonuçlarının grafik dağılımı Şekil 12 ve 13'te verilmiştir.



Şekil 11. Ortofoto harita (sol) ve yükseklik haritası (sağ).

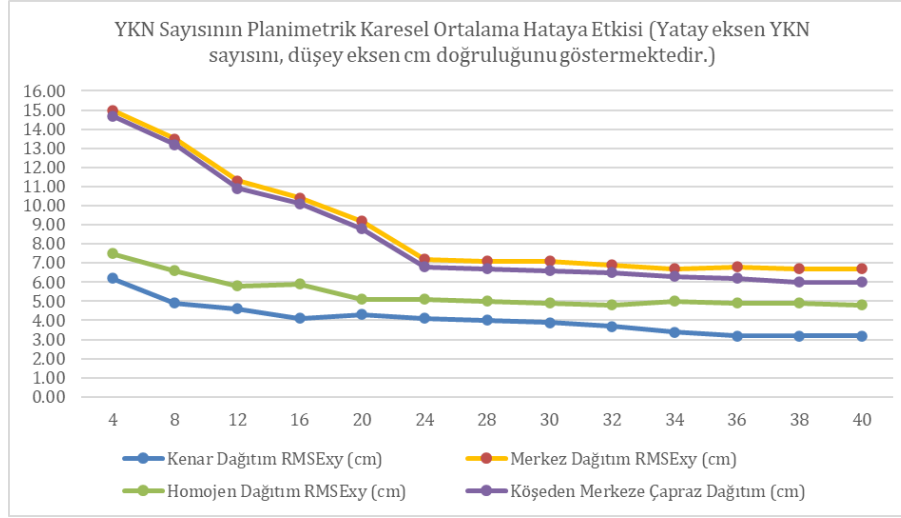
Tablo 3. YKN sayısının ve dağılımının RMSE x,y üzerindeki etkisinin cm olarak sonuçları.

YKN Sayısı	4	8	12	16	20	24	28	30	32	34	36	38	40
Kenar Dağıtım	6.2	4.9	4.6	4.1	4.3	4.1	4	3.9	3.7	3.4	3.2	3.2	3.2
Merkez Dağıtım	15	13.5	11.3	10.4	9.2	7.2	7.1	7.1	6.9	6.7	6.8	6.7	6.7
Homojen Dağıtım	7.5	6.6	5.8	5.9	5.1	5.1	5	4.9	4.8	5	4.9	4.9	4.8
Köşeden Merkeze Çapraz Dağıtım	14.7	13.2	10.9	10.1	8.8	6.8	6.7	6.6	6.5	6.3	6.2	6	6

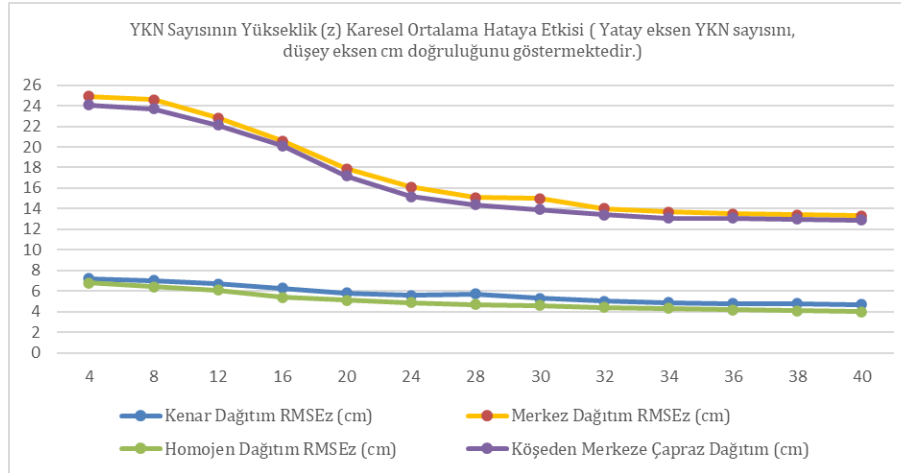
Tablo 4. YKN sayısına göre Yükseklik (z) hata değerleri cm olarak sonuçları.

YKN Sayısı	4	8	12	16	20	24	28	30	32	34	36	38	40
Kenar Dağıtım	7.2	7	6.7	6.3	5.8	5.6	5.7	5.3	5	4.9	4.8	4.8	4.7
Merkez Dağıtım	25	25	23	21	18	16	15	15	14	14	14	13	13

Homojen Dağıtım	6.8	6.4	6.1	5.4	5.1	4.9	4.7	4.6	4.4	4.3	4.2	4.1	4
Köşeden Merkeze Çapraz Dağıtım	24	24	22	20	17	15	14	14	13	13	13	13	13



Şekil 12. YKN sayısının planimetrik (x,y) karesel ortalama hataya etkisinin grafiksel gösterimi.



Şekil 13. YKN sayısının Yükseklik (z) karesel ortalama hataya etkisinin grafiksel gösterimi.

Tablo 3 incelendiğinde en yüksek RMSE değerlerinin 4 YKN alanında elde edildiği, en düşük değerlerin ise 40 YKN için belirlendiği görülmüştür. RMSE_{x,y} değerleri kenar dağılımda 6.20 ile 3.20 cm, merkezi dağılımda 15.00 ile 6.7 cm ve homojen dağılımda 7.5 ile 4.8 cm, köşeden merkeze doğru çapraz dağılımda 14.70 ile 6.00 cm arasında değişmektedir. Yine Tablo 4 incelendiğinde en yüksek RMSE değerlerinin 4 YKN alanında elde edildiği, en düşük değerlerin ise 40 YKN için belirlendiği görülmüştür. RMSE_z değerleri kenar dağılımda 7.20 ile 4.70 cm, merkezi dağılımda 24.90 ile 13.30 cm ve homojen dağılımda 6.80 ile 4.00 cm, köşeden merkeze doğru çapraz dağılımda 24.1 ile 12.90 cm arasında değiştiği görülmektedir. Şekil 12. ve 13'te gösterilen bu değerlere dayanarak, İHA fotogrametrik projelerinde elde edilen SYM'lerin ve ortofotoların doğruluğu üzerinde YKN'lerin sayısının ve dağılımının önemli bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. Ortofoto ve SYM planimetrik değişikliklerini gözlemek için kenarlara yerleştirilenlere ek olarak merkezi dağılımdaki 10 (on) adet YKN kullanılmıştır. Şekil 12'den görülebileceği gibi 24 ve 30 YKN kullanıldığında hata oranı durağan hale gelmiştir. Çalışma alanının merkezine 2, 4, 6 YKN eklendiğinde hata oranı azalmıştır. Eklenen son 4 YKN de ise hata oranı tekrar durağan hale gelmiştir. Kenar dağılımındaki planimetrik değişimi test etmek için yapılan veri analizi, merkez dağılımdaki YKN'lerin (on YKN) üç katının kenar dağılımı desteğiyle en iyi planimetrik doğruluğun elde edildiğini ortaya konulmuştur. En kötü planimetrik doğruluk merkezi dağılımda gözlenmiştir. YKN 24 ve 30 arasında sabit hale gelen hata oranı, kenar dağılımındaki 10 YKN ile azaltılmıştır. Benzer şekilde ortofoto ve SYM Yükseklik (z) doğruluğundaki değişimi gözlemek için kenardakilere ek olarak merkezi dağılımdaki 10 YKN kullanılmıştır. Şekil 13 incelendiğinde YKN 28 ve 30 arasında sabit kalan hata oranının merkezi dağıtımda YKN kullanılmasıyla azaldığı görüldü. Merkezi dağılım analizi, en kötü Yükseklik (z) doğruluğun bu dağılımda gözlemlendiğini göstermiştir. Böylece 28. ve 30. YKN'ler arasında sabit hale gelen hata oranı, kenara yerleştirilen 10 YKN ile azaltılmıştır. Bu dört dağılımda en iyi Yükseklik (z) dağılımı homojen dağılımda elde edilmiştir. Her iki grafiğin incelenmesi, kenar dağılımının planimetrik ve Yükseklik (z) doğruluk üzerindeki etkisinin çok önemli olduğunu göstermiştir.

Literatürde YKN sayısı ve dağılımının İHA fotogrametrisi ile üretilen ortofotolar ve SYM'ler üzerindeki etkisinin analizine odaklanan bazı çalışmalara bakacak olursak; Tahar [24] benzer bir çalışmayı 150 hektarlık bir alanda yapmış ve çalışmada kullanılan YKN'lerin herhangi bir sayı ve dağılımı için planimetrik doğruluğun Yükseklik (z) doğruluktan daha iyi olduğunu bildirmiştir. Ayrıca YKN sayısı arttığında her iki doğruluk rakamının da arttığını belirledi (planimetrik doğruluk 0,49'dan 0,46 m'ye ve Yükseklik (z) doğruluk 0,830'dan 0,780 m'ye). Reshetyuk ve Mårtensson [25] yaptıkları çalışmada 2,73 hektarlık bir alanda farklı YKN varyasyonlarının İHA fotogrametri ürünlerinin doğruluğu üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada beş YKN tüm alana eşit olarak dağıtılmış uçuşlar 81 m ve 163 m olmak üzere iki irtifada yapılmıştır. Bu uçuşlar için RMSE değerleri sırasıyla 0,030 m ve 0,080 m idi. Sonuç olarak bu doğruluğu elde etmek için hektar başına 1,8 YKN önermişlerdir. Sanz-Ablanedo vd. [26], büyük projelerde yüksek doğruluk istendiğinde 100 fotoğraf başına üçten fazla YKN kullanılması gerektiğini önermektedir. Önerilen YKN sayıları bu proje için uygulanırsa çok sayıda YKN'ye ihtiyaç duyulacaktır. Arazi araştırmalarında harcanan süreyi kısaltmak ve maliyetten tasarruf etmek amacıyla haritalamada İHA'lar kullanılmaktadır. Önceki çalışmalarda önerilen sayıda YKN'nin mevcut projede kullanılması, İHA'ların haritalamada kullanılma amacının dışına çıkacaktır. Bu çalışma sonucunda diğer benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında benzer ve doğru sonuçlar elde edilmiştir.

5. Sonuç

İHA'larla fotogrametrik çalışmalar yapılırken saha çalışmasında en çok zaman alan ve kısıtlayıcı görevlerden biri YKN'lerin konumlandırılmasıdır. Çalışma öncesinde YKN'lerin yerleşimi ve olası hataların büyüklüğünün bilinmesi projeye katkı sağlayabilir. Bu çalışma ile optimum planimetrik doğruluğu elde etmek için YKN'lerin çalışma alanının kenarlarına yerleştirilmesi gerektiğini belirlenmiştir. Ancak bu dağılım, optimum Yükseklik (z) doğruluğa yol açmayabilir. Bu nedenle YKN'lerin bir kısmını çalışma alanının merkezine yerleştirerek güçlendirmek, böylece toplam hatayı en aza indirmek gerekmektedir.

Bu çalışmada, İHA fotogrametrisi ile harita üretiminde YKN sayısı ve dağılımının doğruluk üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elde edilen bulgular, YKN sayısının ve dağılımının, üretilen ortofoto ve SYM doğruluğunu önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Çalışma, farklı YKN senaryolarının kullanıldığı ve her senaryonun doğruluk analizi yapıldığı kapsamlı bir analiz sunmaktadır. En iyi sonuçların kenar ve homojen YKN dağılımıyla elde edildiği gözlenmiştir. Özellikle, 40 YKN kullanılarak yapılan homojen dağılımın, hem planimetrik (xy) hem de yükseklik (z) doğruluğunda en düşük hata oranlarını sağladığı tespit edilmiştir. Merkezi dağılım senaryolarında ise doğruluk oranlarının diğer senaryolara göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu durum, YKN'lerin çalışma alanı boyunca dengeli bir şekilde dağıtılmasının, doğruluk üzerindeki olumlu etkisini ortaya koymaktadır.

Araştırmanın sonuçları, İHA fotogrametrisi projelerinde YKN sayısının artırılmasının, doğruluk oranlarını artırdığı, ancak belirli bir noktadan sonra bu artışın sınırlı kaldığını göstermektedir. Bu nedenle, saha çalışmalarının maliyet etkinliği göz önünde bulundurularak, optimum YKN sayısının belirlenmesi ve doğru bir dağılım stratejisinin uygulanması önem arz etmektedir. Sonuç olarak, bu çalışma, İHA fotogrametrisi ile harita üretiminde YKN sayısı ve dağılımının optimizasyonunun, doğruluk ve maliyet etkinliği açısından kritik bir faktör olduğunu ortaya koymakta ve gelecekteki çalışmalar için önemli bir referans noktası sunmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma Mersin Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından **2021-2-TP2-4527** proje numarası ile desteklenmiştir.

Kaynakça

- [1] Yılmaz, A., Ulvi, H. 2022. Kentsel Hava Sahasında İnsansız Hava Aracı Sistemleri Trafik Yönetimi için Verilmesi Gereken Hizmetler ve Kullanılabilecek Bazı Teknolojiler. Turkey Unmanned Aerial Vehicle Journal 4(1), 8-18.
- [2] Ulvi, H. 2019. Arkeolojik Sit Alanlarında Yapılan Çevre Düzenleme Projelerinin Yürünebilirliğe Etkisinin Araştırılması Değle Ören Yeri Örneği. Journal of International Social Research 12(64), 383-402.
- [3] Ferrer-González, E., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Martínez-Carricondo, P. 2020. UAV photogrammetry accuracy assessment for corridor mapping based on the number and distribution of ground control points. Remote sensing, 12(15), 2447.

- [4] Ulvi, A. 2021. The effect of the distribution and numbers of ground control points on the precision of producing orthophoto maps with an unmanned aerial vehicle. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 20(6), 806-817.
- [5] Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Martínez-Carricondo, P. 2017. Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle. *Measurement*, 98, 221-227.
- [6] Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., Reynolds, J.M. 2012. Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314.
- [7] Harwin, S. 2012. Lucieer, A. Assessing the Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-View Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery. *Remote Sens.*, 4, 1573-1599.
- [8] Hugenholtz, C.H., Whitehead, K., Brown, O.W., Barchyn, T.E., Moorman, B.J., LeClair, A., Riddell, K., Hamilton, T. Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS): Feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically-derived digital terrain model. *Geomorphology*, 194, 16-24.
- [9] Yiğit, A. Y., Kaya, Y., Şenol, H. İ. 2023. Açık Maden Ocaklarında İnsansız Hava Aracı (İHA) Kullanımı. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 11(1), 225-235.
- [10] Hamal, S.N.G., Ulvi, A. 2022. Türkiye Coğrafi Bilgi Sistemleri Dergisi, 3B Kent Modelleri oluşturma sürecinde İHA fotogrametrisi ve CBS Entegrasyonu: Mersin Üniversitesi Çiftlikköy Kampüsü Örneği, 4(2), 97-105,
- [11] Fonstad, M.A., Dietrich, J.T., Courville, B.C., Jensen, J.L., Carbonneau, P.E. 2013. Topographic structure from motion: A new development in photogrammetric measurement. *Earth Surf. Process. Landf.*, 38, 421-430.
- [12] Snavely, N., Seitz, S.M. 2008. Szeliski, R. Modeling the World from Internet Photo Collections. *Int. J. Comput. Vis.*, 80, 189-210.
- [13] Ao, T., Liu, X., Ren, Y., Luo, R., Xi, J. 2018. An Approach to Scene Matching Algorithm for UAV Autonomous Navigation. In *Proceedings of the 2018 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Shenyang, China, 9-11 June, 996-1001.
- [14] Erdoğan, A., Mutluoğlu, Ö. 2020. İnsansız Hava Araçları ile Harita Üretim Çalışmalarında Farklı Yüksekliklerde Yapılan Uçuşların Konum Doğruluğuna Etkisi, *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 2(1); 28-35
- [15] Kurban, T., Karkınlı, A.E., Kesikoğlu, A. 2015. Düşük İrtifa Görüntüleme Sistemleri İle Üretilen Haritalarda Konumsal Doğruluğunun İncelenmesi, *Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi*.
- [16] Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Martínez-Carricondo, P. 2017. Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle. *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, 98, 221-227.
- [17] Marangoz, A. M., Karakiş, S., Numan, A. B. 2019. Geleneksel fotogrametri ile insansız hava aracı (İHA) verilerinin kullanılan kamera ve sonuç ürünleri bakımından karşılaştırılması. In *17th Turkey Scientific and Technical Conference*, 25, 27.
- [18] Özcan, O. 2017. İnsansız Hava Aracı (İHA) ile Farklı Yüksekliklerden Üretilen Sayısal Yüzey Modellerinin (SYM) Doğruluk Analizi, *Mühendislik ve Yer Bilimleri Dergisi*, 2, 1, 1-7.

- [19] Öztürk O., Bilgilioğlu B.B., Çelik M.F., Bilgilioğlu S.S., Uluğ R. 2017. İnsanz Hava Aracı (İHA) Görüntüleri ile Ortogörüntü Üretiminde Yükseklik ve Kamera Açısının Doğruluğa Etkisinin Araştırılması. *Geomatik Dergisi*, 2(3),135-141
- [20] Martínez-Carricondo, P., F. Agüera-Vega, F. Carvajal-Ramírez, F.-J. Mesas-Carrascosa, A. García-Ferrer, and F.-J. Pérez-Porras. 2018. Assessment of UAV-photogrammetric Mapping Accuracy Based on Variation of Ground Control Points. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 72, 1–10.
- [21] Oniga V. E., Breaban A. I., Statescu F. 2018. Determining the Optimum Number of Ground Control Points for Obtaining High Precision Results Based on UAS Images, *Proceedings 2018*
- [22] Ferrer-Gonzalez E., Agüera-Vega F., Carvajal-Ramirez F., Martínez-Carricondo P. 2020. UAV Photogrammetry Accuracy Assessment for Corridor Mapping Based on the Number and Distribution of Ground Control Points, *Remote Sensing*, 12, 2447.
- [23] Martínez-Carricondo, P., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Mesas-Carrascosa, F.J., García-Ferrer, A., Pérez-Porras, F.J. 2018. Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 2018, 72, 1–10.
- [24] Tahar, K.N. 2013. An Evaluation on Different Number of Ground Control Points in Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetric Block. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. ISPRS Arch.* 2013, XL-2/W2, 27–29.
- [25] Reshetyuk, Y., Mårtensson, S.G. 2016. Generation of Highly Accurate Digital Elevation Models with Unmanned Aerial Vehicles. *Photogramm. Rec.*, 31, 143–165.
- [26] Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J.H., Rodríguez-Pérez, J.R., Ordóñez, C. 2018. Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM photogrammetry survey as a function of the number and location of ground control points used. *Remote Sens.*, 10, 606.
- [27] James, M.R., Robson, S. 2012. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 117, 1–18.
- [28] Kabadayı, A, Erdoğan, A. 2022 Application of Terrestrial Photogrammetry Method in Cultural Heritage Studies: A Case Study of Seyfeddin Karasungur. *Mersin Photogrammetry Journal*, 4(2), 62-67.
- [29] Kaya, Y, Şenol, H. İ., Polat, N. 2021. Three-dimensional Modeling and Drawings of Stone Column Motifs in Harran Ruins, *Mersin Photogrammetry Journal*, 3(2), 48-52.
- [30] Kaya, Y., Temel, D., 2022. Cep Telefonu Kameralarından Elde Edilen Görüntüler ile Kültürel Miras Eserlerinin Modellenmesi, *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 4(1), 17-22.
- [31] Kılınç, Ç., Uysal, M. 2021. Küçük Ölçekli Fotogrametrik Haritalarda Nokta Bulutu Filtreleme Yöntemleri ile Eşyükseklik Eğrisi Üretimi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(1), 167-178.
- [32] Polat, N. 2023. An Investigation of Ancient Water Collection and Storage Systems Near the Karahantepe Neolithic Site Using UAV and GIS, *Environmental Archaeology*, 28(6), 475-487.
- [33] Dörtbudak, E. B., Akça, Ş., Polat, N. 2023. Exploring structural deterioration at historical buildings with UAV photogrammetry, *Cultural Heritage and Science*, 4(2), 62-68.

[34] Fonstad, M. A., Dietrich, J. T., Courville, B. C., Jensen, J. L., Carbonneau, P. E. 2013. Topographic Structure from Motion: A New Development in Photogrammetric Measurement, *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(4), 421-430.

[35] Javernick, L., Brasington, J., Caruso, B. 2014. Modeling the Topography of Shallow Braided Rivers Using Structure-from-motion Photogrammetry, *Geomorphology*, 213, 166-182.

[36] Dietrich, J. T. 2017. Bathymetric Structure-from-Motion: Extracting Shallow Stream Bathymetry from Multi-View Stereo Photogrammetry, *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(2), 355-364.

[37] Akar, A. 2017. Evaluation of Accuracy of Dems Obtained from Uav-point Clouds for Different Topographical Areas, *International Journal of Engineering and Geosciences*, 2(3), 110-117.

[38] Zeybek, M. 2021. Classification of UAV Point Clouds By Random Forest Machine Learning Algorithm. *Turkish Journal of Engineering*, 5(2), 48-57.

[39] Zeybek, M., Kaya, A. 2020. Tarihi Yiğma Kiliselerde Hasarların Fotogrametrik Ölçme Tekniğiyle İncelenmesi: Artvin Tbeti Kilisesi Örneği. *Geomatik*, 5(1), 47-57.

[40] Ahmadabadian, A. H., Karami, A., Yazdan, R. 2019. An Automatic 3D Reconstruction System for Texture-less Objects, *Robotics and Autonomous Systems*, 117, 29-39.

[41] Perry, B. J., Guo, Y., Atadero, R., van de Lindt, J. W. 2020. Streamlined Bridge Inspection System Utilizing Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and Machine Learning. *Measurement*, 164, Article number 108048.

[42] Czyża, S., Szuniewicz, K., Kowalczyk, K., Dumalski, A., Ogrodniczak, M., Zieleniewicz, Ł. 2023. Assessment of accuracy in unmanned aerial vehicle (uav) pose estimation with the real-time kinematic (rtk) method on the example of dji matrice 300 rtk. *Sensors*, 23(4), 2092.

[43] <https://www.ferntech.co.nz/dji-matrice-300-rtk-photogrammetry-combo> (Erişim Tarihi: 21.03.2024)

[44] <https://paksoytekniik.com.tr/urun/topcon-hiper-sr/> (Erişim Tarihi: 21.03.2024)

[45] Oruc, M. 2023. Maden sahalarındaki deformasyonların İHA verileri ile izlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin Üniversitesi, 99s, Mersin, Türkiye

Boru Demetinde Kanat Şekilli Boru Kullanımının Entropi Üretimi ve Alan Uyum Faktörü Yönünden Sayısal Olarak İncelenmesi

Muhammet Nasıf KURU¹, Mehmet ÖZKARAKOÇ^{2*}, Şaban ÜNAL³, Mehmet Tahir ERDİNÇ², İlyas KARASU⁴
ORCID, Orhan AYDIN⁵

¹ Tarsus Üniversitesi, Mersin Tarsus Organize Sanayi Bölgesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Tarsus, Mersin

^{2*} Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Tarsus, Mersin

³ Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Osmaniye

⁴ Samsun Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, Samsun

⁵ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Trabzon

(Alınış / Received: 08.06.2024, Kabul / Accepted: 13.08.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.08.2024)

Anahtar Kelimeler

Boru demeti,
Kanat şekilli boru,
Isı transferi,
Basınç düşümü,
Entropi üretimi
Alan uyum faktörü

Öz: Bu çalışmada, düzgün sıralı ve kaydırılmış sıralı dizilişe sahip boru demetinde dairesel ve kanat şekilli boru kullanımı sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada kanat şekilli boru kullanımını, ısı transferi, basınç düşümü, entropi üretimi ve alan uyum faktörü yönünden incelenerek dairesel olana göre avantajları ve dezavantajları detaylıca tartışılmıştır. Akışın sıkıştırılmaz, kararlı, türbülanslı ve iki boyutlu olduğu varsayılmıştır. Dairesel ve kanat şekilli boruların ısı transfer yüzey alanları eşit ve eş değer çapları $D_e = 22,44$ mm olarak tutulmuştur. Soğutucu akışkan olarak hava kullanılmıştır. Giriş hızına bağlı olarak tanımlanan Reynolds sayısı (Re_g), 4000-7000 aralığında değişmektedir. Çalışmada, kanat şekilli boru demetinin alan uyum faktörü, entropi üretimi ve basınç düşümü yönünden dairesel olana göre üstün olduğu tespit edilmiştir. $Re_g = 4000$ ve $S_T^* \times S_L^* = 2 \times 2$ değerlerinde, alan uyum faktörü kaydırılmış sıralı dizilişe sahip kanat şekilli boru demetinde en yüksek değerdedir ve dairesel olana göre %314,93 yüksek olduğu gösterilmiştir. Bu durumda, entropi üretimi ise %20,62, sürtünme faktörü %74,89 ve ortalama Nusselt sayısı %19,80 azalmaktadır.

The Parametric Investigation of the Use of Wing-Shaped Tube in Tube Bank in Terms of Entropy Generation and Area Goodness Factor

Keywords

Tube bank,
Wing-shaped tube,
Heat transfer,
Pressure drop
Entropy generation
Area goodness factor

Abstract: In this study, the use of circular and wing-shaped tubes in tube banks with in-line and staggered arrangement is numerically investigated. The advantages and disadvantages of the wing-shaped tube utilization over the circular one are discussed in detail by analyzing the heat transfer, pressure drop, entropy generation and area goodness factor. The flow is assumed to be incompressible, steady, turbulent and two-dimensional. The heat transfer surface areas of the circular and wing-shaped tubes are assumed to be equal and their equivalent diameters are maintained as $D_e = 22,44$ mm. Air is used as the refrigerant. The Reynolds number (Re_g), which is defined depending on the inlet velocity, varies between 4000-7000. In the study, it was found that the wing-shaped tube bank is superior to the circular one in terms of area goodness factor, entropy generation and pressure drop. At $Re_g = 4000$ ve $S_T^* \times S_L^* = 2 \times 2$, the area goodness factor is the highest for the wing-shaped tube bank with staggered arrangement and is shown to be 314.93% higher than the circular one. In this case, the entropy generation decreases by 20.62%, the friction factor by 74.89% and the average Nusselt number by 19.80%.

1. Giriş

Boru demeti ısı değiştiricileri, enerji üretimi, ısıtma, soğutma ve iklimlendirme alanlarında verimli ve kolay uygulanabilir olmaları sebebiyle sıklıkla tercih edilmektedir. Artan hammadde ve enerji maliyetleri sebebiyle boru demeti ısı değiştiricilerinden kaynaklı yatırım ve işletme maliyetlerinin düşürülmesi için aktif ve pasif yöntemler kullanılmaktadır. Literatürde, ek enerjiye ihtiyaç duymayan birim hacim başına daha yüksek ısı transferi ve daha düşük basınç düşümü elde ederek ısı performansını iyileştirmesini amaçlayan dairesel ve dairesel olmayan boru geometrileri ile gerçekleştirilen pasif yöntemli çok sayıda deneysel, sayısal ve analitik çalışma yer almaktadır.

Hilpert [1] ve Grimison [2], dairesel şekilli boru demetlerinde ortalama Nusselt sayılarının belirlenebilmesi için deneysel bağıntılar sunmuşlardır. Bergelin vd. [3, 4], düşük ve orta Reynolds sayısı aralığındaki dairesel şekilli boru demetlerindeki çalışmaları özetlemişlerdir. Žukauskas [5, 6], düzgün ve kaydırılmış sıralı dizilişe sahip dairesel şekilli boru demetlerindeki akış ve ısı geçişine Reynolds ve Prandtl sayıları gibi birçok boyutsuz sayının etkilerine dair kapsamlı sonuçlar sunmuştur. Shaboury ve Ormiston [7], düzgün sıralı dizilişe sahip dairesel şekilli boru demetinde Reynolds sayısı ve boyutsuz adım değerlerine bağlı olarak ısı transferi ve akışı sayısal olarak incelemişlerdir. Khan vd. [8], düzgün ve kaydırılmış sıralı dairesel şekilli boru demetlerindeki ısı transferini analitik olarak incelemişlerdir. Isı transferindeki artışın, akış yönüne dik boru adımıdaki artışa göre akış boyuna boru adımıdaki artıştan daha fazla etkilendiği tespit edilmiştir. Gaddis [9], düzgün sıralı ve kaydırılmış sıralı tip boru demetlerindeki basınç kayıplarının belirlenmesi için kapsamlı ifadeler sunmuştur. Yılmaz ve Yılmaz [10], dairesel şekilli boru demetinde ısı transferi ve basınç düşümü kaynaklı entropi üretimini incelemişlerdir. Düşük hızlarda entropi üretiminde ısı transferinin basınç düşümüne kıyasla daha etkin olduğu sonucuna varmışlardır.

Isı değiştiricilerde dairesel şekilli boru, imalatının kolay olması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, araştırmacılar, pasif ısı transferi iyileştirme yöntemlerinden olan akışa daha uygun boru şekilleri kullanımı ile akış karışımını arttırıp sınır tabaka yenilenmesini sağlayarak sürtünme direncini azaltmayı ve ısı verimi arttırmayı amaç edinen çalışmalar da yapmaktadırlar. Horvat vd. [11], kaydırılmış sıralı dizilişe sahip dairesel, kanat ve elips şekilli boru demetlerinde akış ve ısı transferini zamana bağlı olarak sayısal olarak incelemişlerdir. Her üç boru şeklinde de zamana bağlı ortalama Stanton sayısı ve sürüklenme faktörü, Reynolds sayısının artışı ile azalmıştır. Basınç düşümü dikkate alındığında elips şekilli ve dairesel şekilli boru demetine göre kanat şekilli boru demetinin daha üstün performans sergilediği tespit edilmiştir. Bayat vd. [12], kaydırılmış sıralı kam şekilli boru demetinde akış ve ısı transferini sırası ile akış yönüne dik ve boyuna boyutsuz adımı eşit ve 1,25, 1,5, 2 için deneysel olarak incelemişlerdir. Boyutsuz adım artışı ile ısı transfer miktarı arttığı gözlenmiştir. Kam şekilli boru demetinde, aynı ısı transfer yüzey alanına sahip dairesel şekilli boru demetine göre %5-11 aralığında daha az ısı transferi, %64 daha az sürtünme faktörü değerleri elde edilmiştir. Kam şekilli boru demetinde elde edilen ısı hidrolik performans ve alan uyum faktörü dairesel şekilli boru demetindekilerin, sırasıyla, 5 ve 12-14 katı olduğu tespit edilmiştir. Mangrulkar vd. [13], düzgün sıralı kam şekilli boru demetinde ısı transferi ve sürtünme faktörünü $11500 \leq Re_D \leq 42500$ aralığında sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal incelemede, üç boyutlu olarak, 4 sıra boyuna ve 4 sıra dikine boru demeti incelenmiştir. Reynolds sayısı ve S_L^* arttıkça türbülans arttığı için ısı transferi arttığı görülmüştür. Akış yönüne göre boyuna adım oranının artması sirkülasyon bölgesinin artmasına, ısı transferinin ve sürtünme faktörünün ve basınç kaybının artmasına, etkinlik ve A_{GF} 'nin ($A_{GF} = \frac{\overline{Nu}}{Re_g Pr^{1/3}}$) azalmasına neden olduğu tespit edilmiştir. Reynolds sayısının artması sürtünme faktörünü azaltmakta, THP'yi arttırmakta olduğu tespit edilmiştir. Kam şekilli boru kullanımının, A_{GF} 'nin dairesel şekilli boru kullanımına göre 9-10 kat artmasına neden olduğu tespit edilmiştir. Kam şekilli boru demetinin dairesel şekilli boru demetine göre daha fazla ısı transferi gerçekleştirdiği ve daha iyi bir termal performansına sahip olduğu tespit edilmiştir. Kam şekilli boru kullanımı f_i dairesel şekilli boru kullanımına göre %85-89 düşürmüştü ve THP'yi ise 5 kat arttırmıştır. Khan vd. [14] tarafından yapılan çalışmada, elips şekilli boru demetinde toplam ısı transferi ve sürüklenme katsayısı analitik olarak hesaplanmıştır. Sabit yüzey akışı ve sabit yüzey sıcaklığı sınır koşullarında hücum açısı 0° , laminar, kararlı ve iki boyutlu akış kabulü yapılmıştır. Reynolds sayısı 100 iken sürüklenme katsayısı eşit ısı transfer yüzeyine sahip dairesel şekilli boru kullanımına göre eliptik eksen oranı 0,5 olan elips şekilli boru kullanımında %66,7, eliptik eksen oranı 0,25 olması durumunda ise %83,3 azalmaktadır. Sayed Ahmed vd. [15], kaydırılmış sıralı dizilişe sahip kanat şekilli boru demetinde akış ve ısı transferini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Kanat şekilli boru kullanımının dairesel şekilli boru kullanımına göre ısı transferini %34 arttırdığı ve basınç düşümünü ise %37 azalttığı tespit edilmiştir.

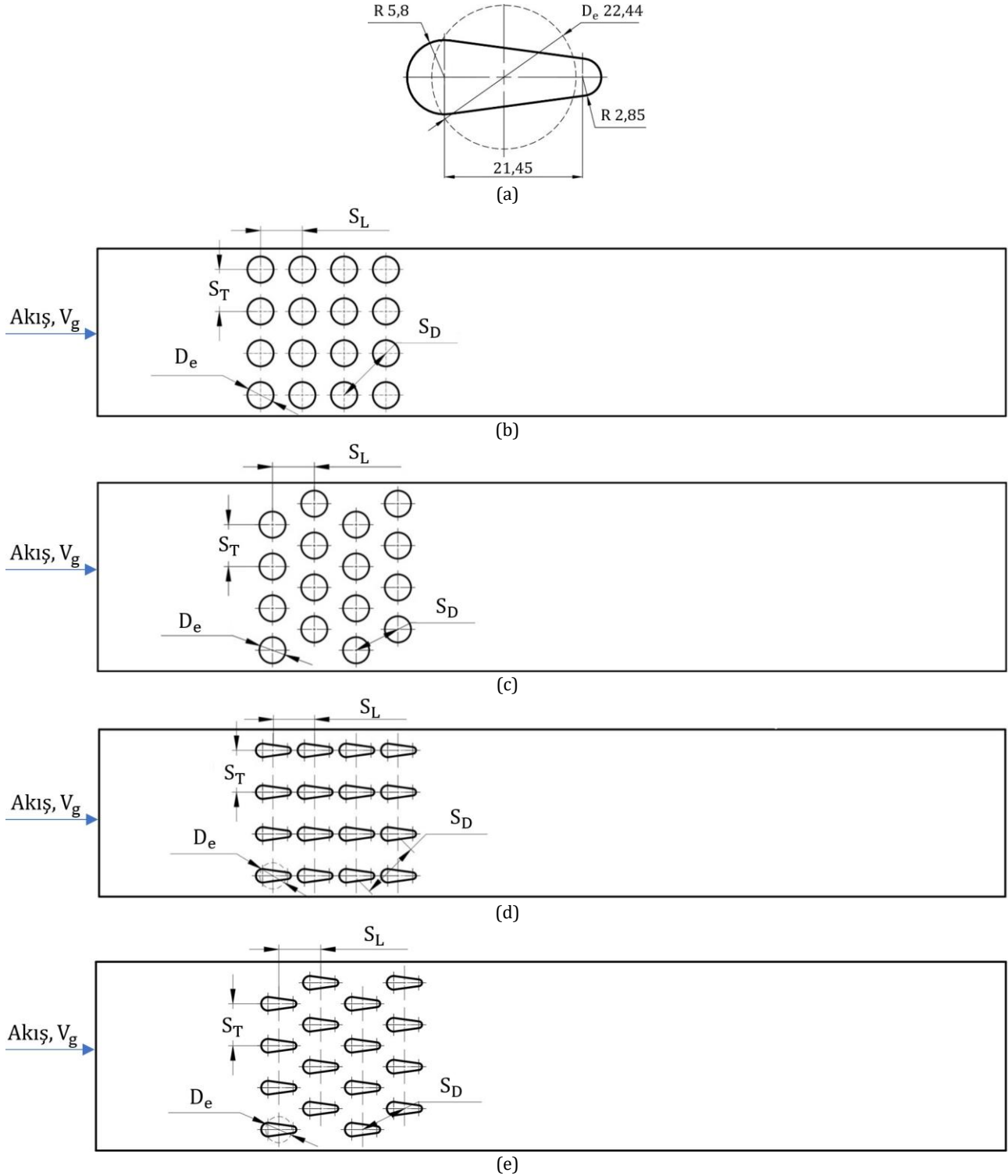
Literatürdeki çalışmalardan da anlaşılacağı üzere farklı boru şekillerinin ısı transferi, basınç düşümü, entropi üretimi ve alan uyum faktörü üzerinde etkilidir. Bu çalışma kapsamında literatürden farklı olarak düzgün/kaydırılmış sıralı dairesel/kanat şekilli boru kullanımı (dört durum) ve enine ve boyuna boyutsuz adım oranlarının üç farklı değeri ($S_L^* \times S_L^* = 1,3 \times 1,3$, $S_L^* \times S_L^* = 1,6 \times 1,6$, $S_L^* \times S_L^* = 2 \times 2$) için kapsamlı sayısal testler

yapılmış ve her bir durum için ısı transferi, basınç düşümü, entropi üretimi ve alan uyum faktörü ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Parametrik modeller

Kanat şekilli boru kesiti Şekil 1a, düzgün ve kaydırılmış sıralı dizilişe sahip dairesel ve kanat şekilli boru demeti durumları ise sırasıyla Şekil 1b, 1c, 1d ve 1e'de gösterilmektedir. Bu çalışmada, dört durum için enine ve boyuna boyutsuz adım oranlarının üç farklı değeri ($S_T \times S_L = 1,3 \times 1,3$, $S_T \times S_L = 1,6 \times 1,6$, $S_T \times S_L = 2 \times 2$) dikkate alınmıştır. Isı transferi yüzey alanı dairesel ve kanat şekiller için eşittir ve eşdeğer çap $D_e = 22,44$ mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 1. (a) Kanat şekilli boru kesiti (mm) (b) düzgün sıralı dairesel şekilli boru demeti (c) kaydırılmış sıralı dairesel şekilli boru demeti (d) düzgün sıralı kanat şekilli boru demeti (e) kaydırılmış sıralı kanat şekilli boru demeti

2.2. Korunum denklemleri

Akışın sıkıştırılmaz, kararlı, türbülanslı ve iki boyutlu olduğu kabul edilmiştir. Türbülans modeli olarak RNG k-ε geliştirilmiş duvar fonksiyonu kullanılmıştır. Türbülans ve korunum denklemleri aşağıda verilmiştir [16]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu}{Pr} \frac{\partial T}{\partial x_j} + \frac{\mu}{Pr_t} \left(\frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \right] \quad (3)$$

Türbülans kinetik enerjisi ve yayılım denklemleri, aşağıda verilmiştir:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

α_k ve α_ε , k ve ε 'un ters efektif Prandtl sayısı olarak gösterilir. Türbülans kinetik enerjisinin oluşumu G_k ile tanımlanmakta olup Eş. (6) ile hesaplanır.

$$G_k = -\mu_t \left[2 \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)^2 \right] \quad (6)$$

Efektif türbülans vizkozitesi μ_{eff} ile tanımlanır ve Eş. (7) ile hesaplanır. μ_t değeri ise Eş. (8) ile hesaplanır.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (7)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

Eş. (8)'de, $C_\mu = 0,0845$ olarak kabul edilmiştir. Eş. (5)'te $C_{1\varepsilon}$ ve $C_{2\varepsilon}$ sabitleri sırasıyla 1,42 ve 1,68 olarak alınmıştır [16].

2.3. Veri analizi

Giriş Reynolds sayısı (Re_g), hava giriş ortalama hızına (V_g) bağlı olarak,

$$Re_g = \frac{\rho V_g D_e}{\mu} \quad (9)$$

şeklinde tanımlanır. Enine ve boyuna boyutsuz adım oranları (S_T^* ve S_L^*) şu şekilde tanımlanmıştır:

$$S_T^* = \frac{S_T}{D_e} \quad (10)$$

$$S_L^* = \frac{S_L}{D_e} \quad (11)$$

Ortalama Nusselt sayısı (\overline{Nu}),

$$\overline{Nu} = \frac{q'' D_e}{k_{hava} \Delta T_{LM}} \quad (12)$$

ifadesinden elde edilir. Burada, q'' boru yüzeyindeki ısı akısı [W/m^2], k_{hava} havanın ısı iletim katsayısı [$W/m.K$] ve ΔT_{LM} logaritmik sıcaklık farkını [K] temsil etmektedir. Logaritmik ortalama sıcaklık farkı,

$$\Delta T_{LM} = \frac{(T_{duvar} - T_{giris}) - (T_{duvar} - T_{cikis})}{\ln \frac{T_{duvar} - T_{giris}}{T_{duvar} - T_{cikis}}} \quad (13)$$

şeklinde tanımlanır. Burada, T_{duvar} [K] boru yüzey sabit sıcaklığını, T_{giris} [K] hava giriş sıcaklığını ve T_{cikis} [K] hava çıkış sıcaklığını temsil etmektedir.

Film sıcaklığı (T_f),

$$T_f = \frac{T_{duvar} + T_{giris}}{2} \quad (14)$$

ifadesinden hesaplanır. Sürtünme faktörü (f),

$$f = \frac{2 \Delta P}{N_L \rho V_g^2} \quad (15)$$

ifadesinden belirlenir. Burada, N_L akış yönündeki boru sayısını temsil etmektedir. Alan uyum faktörü [18],

$$A_{GF} = \frac{\overline{Nu}}{Re_g Pr^{1/3} f} \quad (16)$$

şeklinde hesaplanır. Entropi üretimi (\dot{S}_{gen}) [19],

$$\dot{S}_{gen} = \frac{Q (T_{giris} - T_{duvar})}{T_{giris} T_{duvar}} + \frac{\dot{m} \Delta P}{\rho T_{giris}} \quad (17)$$

ifadesinden hesaplanmıştır. Burada \dot{m} kütleli debiyi ifade etmektedir. Kütleli debi (\dot{m}),

$$\dot{m} = \rho A V_g \quad (18)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Burada; A boru demeti hava giriş kesit alanı olarak tanımlanır. A , düzgün ve kaydırılmış sıralı durumlar için, sırasıyla,

$$A = 4 S_T \quad (19)$$

$$A = 4,5 S_T \quad (20)$$

ifadeleriyle hesaplanır. Taşınım ile gerçekleşen ısı transferi (Q),

$$Q = q'' \pi D_e N L \quad (21)$$

şeklinde hesaplanır. Burada N toplam boru sayısını ve L boru boyunu temsil etmektedir.

2.4. Sayısal yöntem

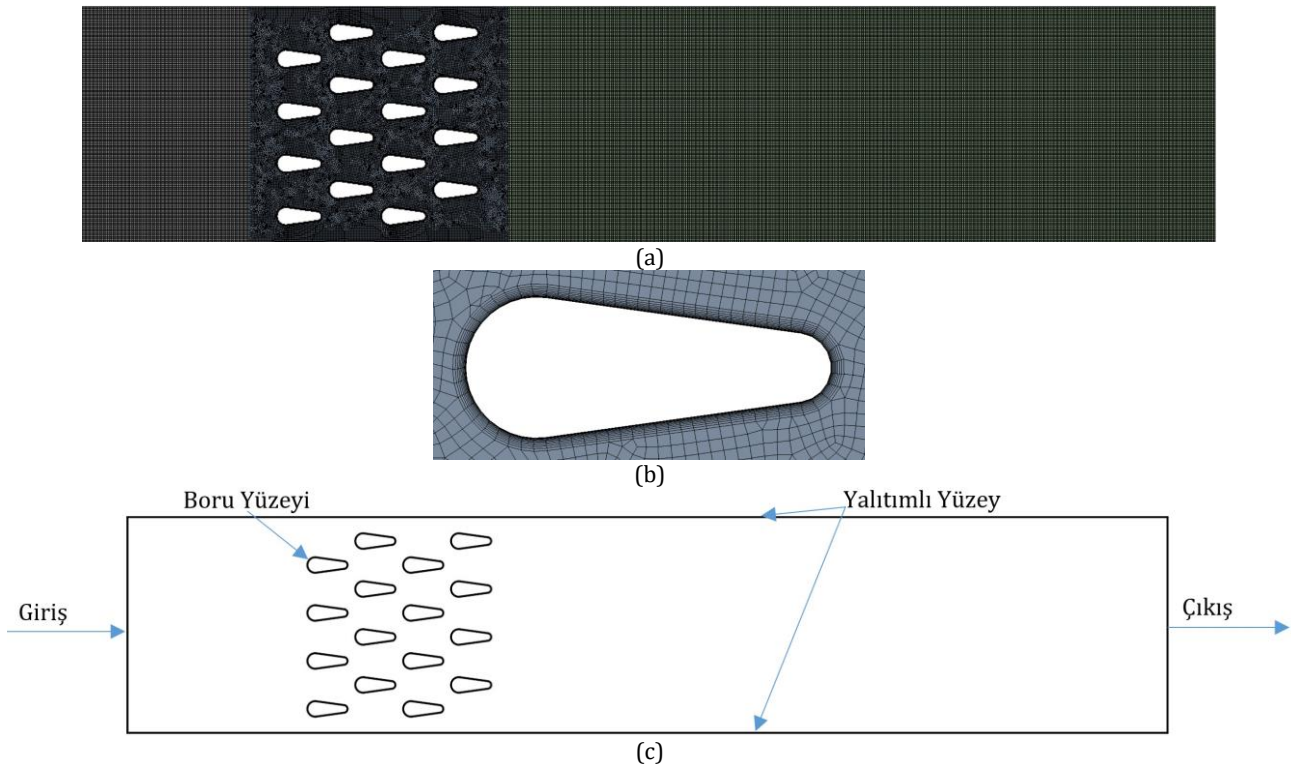
Basınç-hız bağlantısı için COUPLED algoritması kullanılmış olup türbülanslı kinetik enerji ve momentumun ana denklemleri, ikinci mertebeden ayrıklaştırma şeması ile çözülmüştür. Enerji denklemleri için 10^{-8} , süreklilik denklemleri için 10^{-5} , diğer akış denklemleri için 10^{-6} değerleri yakınsama kriteri olarak kullanılmıştır. Borular etrafında Quad/Tri elemanlar ağ yapısı için kullanılmıştır (Şekil 2a). Isı transfer yüzeylerine komşu ağ noktaları ise dörtgensel elemanlar kullanılarak sıklaştırılmış (Şekil 2b) olup $y+$ değerleri 1 ile 5 aralığında tutulmuştur. Sınır

yüzeyleri temsilen kanat şekilli boru demeti üzerinde Şekil 2c'de gösterilmektedir. Sınır koşulları Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Sınır Koşulları

Yüzey	Sınır Koşulu	Açıklama
Giriş	hız-girişi	Sıcaklık ve hız dağılımları sabit ve düzenlidir. $T_{giris} = 48,5^{\circ}C$
Çıkış	basınç-çıkışı	Akış yönündeki hız ve sıcaklık gradyanları sıfıra eşittir. Çıkış basıncı atmosfer basıncına eşittir.
Yalıtımlı Yüzey	duvar	Yüzeylerin iyi yalıtıldığı, dışarıya ısı kaybı olmadığı kabul edilmiş ve kaymama sınır şartı uygulanmıştır.
Boru Yüzeyi	duvar	Sabit duvar sıcaklık ve kaymama sınır şartı uygulanmıştır. $T_{duvar} = 7,6^{\circ}C$

$Re_g = 9700$ değerinde ağdan bağımsızlık çalışması yapılmıştır. Altı farklı eleman sayısı için sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir. 5 numaralı ağ yapısı ile 6 numaralı ağ yapısının arasındaki fark ortalama Nusselt sayısı için %1,08'dir. Hesaplama süresini kısaltmak için 5 numaralı ağ kullanılmıştır.



Şekil 2. Kaydırılmış sıralı dizilişe sahip kanat şekilli borulu sahip boru demeti için (a) ağ yapısı (b) tek bir boru etrafındaki ağ yapısı (c) sınır koşulları

Tablo 2. Farklı eleman sayıları için $Re_g = 9700$ değerinde ağdan bağımsızlık çalışması

No.	Eleman Sayısı	\overline{Nu}
1	3579	39,396
2	6542	75,044
3	21012	78,054
4	53264	78,454
5	94980	80,591
6	220902	81,462

2.5. Doğrulama

Sayısal çalışmaların doğruluğunun tespiti için hesaplamalar analitik sonuçlar ve/veya deneysel veriler ile karşılaştırılmalıdır. Bu çalışmanın doğrulanmasında, Sayed Ahmed vd. [15] tarafından kaydırılmış sıralı dizilişe sahip kanat şekilli boru demeti için sunulan deneysel veriler ve Žukauskas [5] tarafından kaydırılmış sıralı dizilişe sahip dairesel şekilli boru demeti için sunulan deneysel veriler kullanılmıştır. Doğrulama çalışmasında, akışkan olarak hava kullanılmış ve havanın film sıcaklığındaki (T_f) termofiziksel özellikleri Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Doğrulama çalışmalarında kullanılan havanın termofiziksel özellikleri

Özellik	Değer
Isı iletim katsayısı (W/m. K)	0,02648
Yoğunluk (kg/m³)	1,172
Özgül ısı (J/kg. K)	1006
Dinamik viskozite (kg/m. s)	18,60x10 ⁻⁶
Prandtl sayısı	0,7045
Boru yüzey Prandtl sayısı	0,701

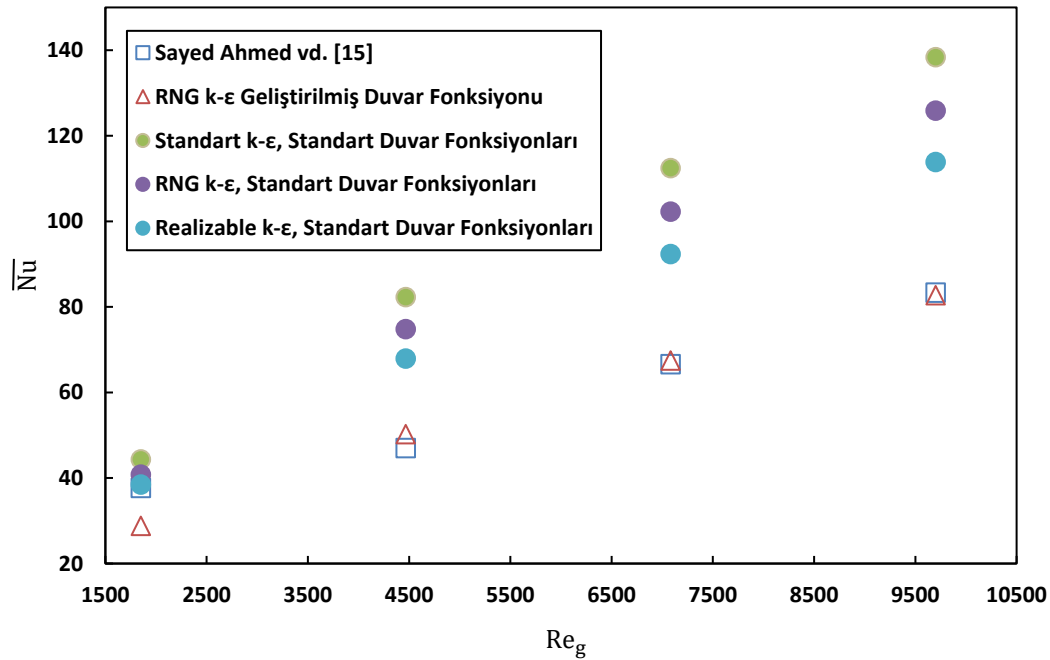
Doğrulama çalışmasının ilk bölümünde kaydırılmış sıralı dizilişe sahip kanat şekilli boru demetinin doğrulaması yapılmıştır. Bu bölümde referans olarak kullanılan Sayed Ahmed vd. [15] tarafından incelenen boru demetine ait veriler Tablo 4'te sunulmuştur. İncelenen boru demeti için ortalama Nusselt sayısı (\overline{Nu}) ve Eş. (22) ile basınç düşüm sabiti (P_{dc}) hesaplanmıştır.

Tablo 4. Sayed Ahmed vd. [15] tarafından incelenen boru demetine ait veriler

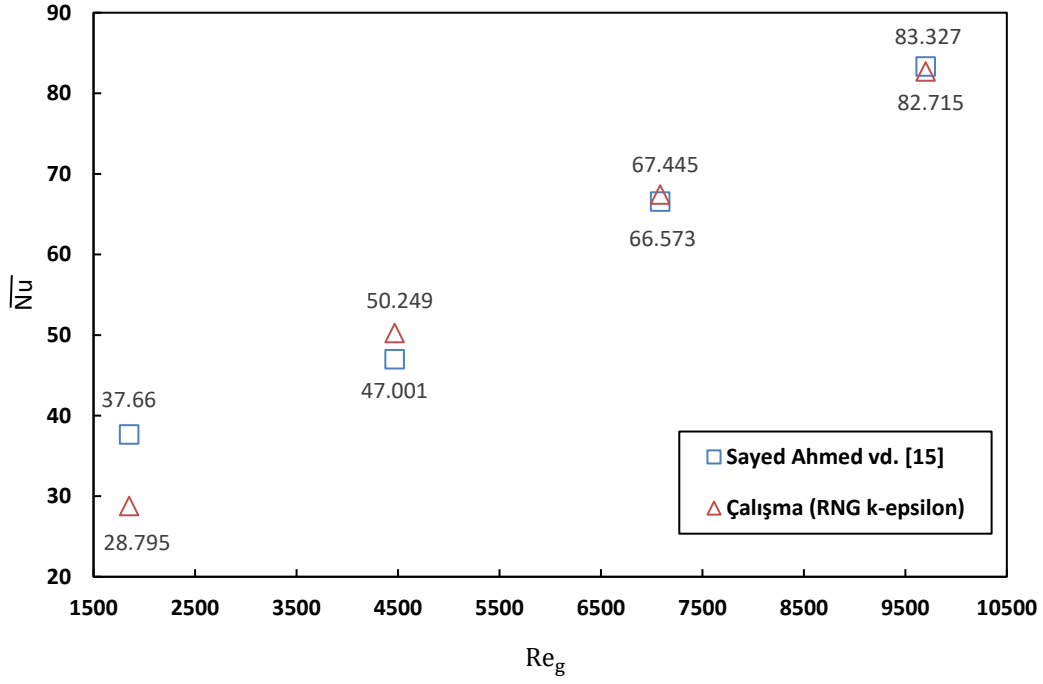
Özellik	Değer
Eşdeğer boru çapı (mm)	22,44
Akış yönü boyuna adım (mm)	37
Akış yönüne dik adım (mm)	37
Boru sayısı	3x7 (toplam 22)
Dış sıcaklık (°C)	48,5
Boru yüzey sıcaklığı (°C)	7,6
Giriş Reynolds sayısı	1850 - 9700

$$P_{dc} = \frac{2 \Delta P}{\rho V_g^2} \quad (22)$$

Ortalama Nusselt sayısının (\overline{Nu}) giriş Reynolds sayısına göre değişimi dört farklı türbülans modeline göre incelenmiş ve sonuçlar Şekil 3a'da sunulmuştur. Sayed Ahmed vd. [15] sonuçları ile farklı türbülans modelleri kullanılarak elde edilen sonuçlar kıyaslandığında, en uyumlu sonuçların RNG k- ϵ Geliştirilmiş Duvar Fonksiyonu ile elde edildiği görülmüştür ve bu model kullanılmıştır. RNG k- ϵ Geliştirilmiş Duvar Fonksiyonu türbülans modeli için, ortalama Nusselt sayısının (\overline{Nu}) giriş Reynolds sayısına göre değişimi, Şekil 3b'de gösterilmiştir. Seçilen model için, $Re_g = 9700$ 'de hata oranı %0,74 iken $Re_g = 7083$ 'de hata oranı %1,29 olarak gerçekleşmiştir.



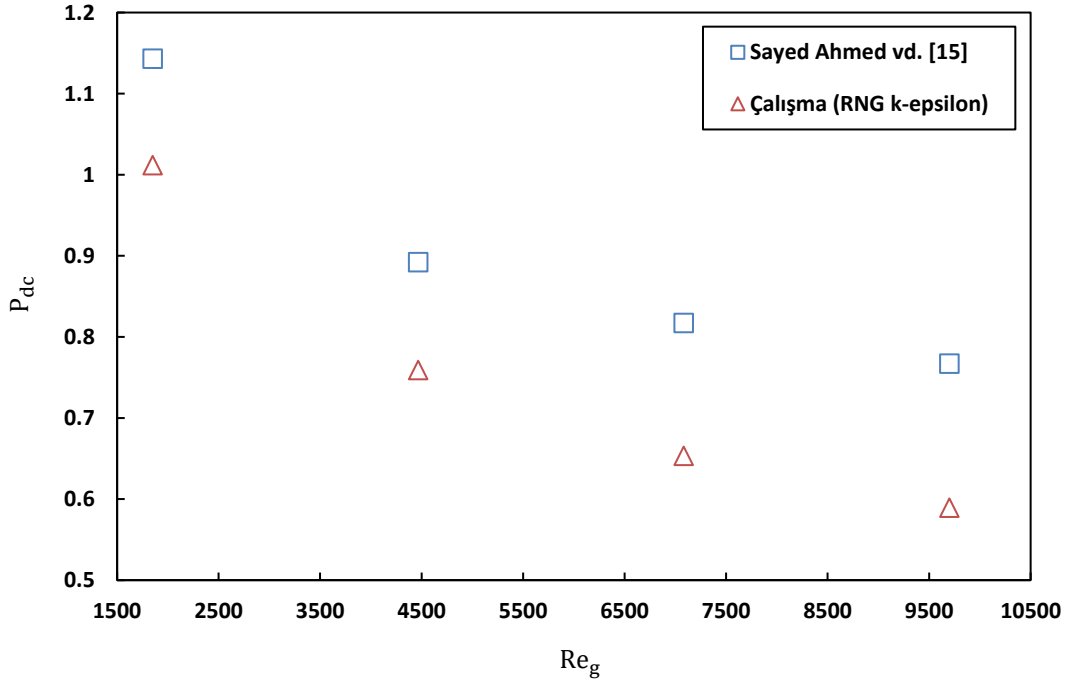
(a)



(b)

Şekil 3. Ortalama Nusselt sayısının giriş Reynolds sayısı ile değişimi a) dört farklı türbülans modele göre b) en uyumlu türbülans modele göre

Basınç düşümü sabitinin (P_{dc}) giriş Reynolds sayısına göre değişimi, Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Basınç düşümü sabitinin giriş Reynolds sayısı ile değişimi

Sayed Ahmed vd. [15] tarafından sunulan deneysel veriler ile **RNG k – ε** modeli sonuçlarının uyumlu olduğu Tablo 5 ile gösterilmektedir.

Tablo 5. Doğrulama çalışmasının Sayed Ahmed vd. [15] tarafından sunulan deneysel sonuçlara göre farkı

Re	\bar{Nu}	P_{dc}
	Fark (%)	
1850	23,5396	11,1549
4467	-6,9105	14,7063

7083	-1,3098	20,1102
9700	0,7345	23,7379

Doğrulama çalışmasının ikinci bölümünde Žukauskas [5] tarafından sunulan deneysel veriler ile karşılaştırılan ve değerleri Tablo 6'da sunulan kaydırılmış sıralı dairesel şekilli boru demeti için ortalama Nusselt sayısı (\overline{Nu}) ve sürtünme faktörü (f) hesaplanmıştır.

Tablo 6. Kaydırılmış sıralı dairesel şekilli boru demetine ait veriler

Özellik	Değer
Boru çapı (mm)	22,44
Akış yönü dik adım (mm)	33,66
Diyagonal adım (mm)	33,66
Boru sayısı	4x4 (toplam 14)
Dış sıcaklık (C)	48,5
Boru yüzey sıcaklığı (C)	7,6
Maksimum Reynolds sayısı	1850 - 9700

Diyagonal adım (S_D),

$$S_D = \left[S_L^2 + \left(\frac{S_T}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (23)$$

şeklinde tanımlanır. $2(S_D - D) > (S_T - D)$ olduğundan Maksimum ortalama hız,

$$V_{\max} = \frac{S_T}{S_T - D} V_g \quad (24)$$

ifadesinden elde edilir. Maksimum Reynolds sayısı (Re_{\max}) maksimum ortalama hıza (V_{\max}) bağlı olarak

$$Re_{\max} = \frac{\rho V_{\max} D}{\mu} \quad (25)$$

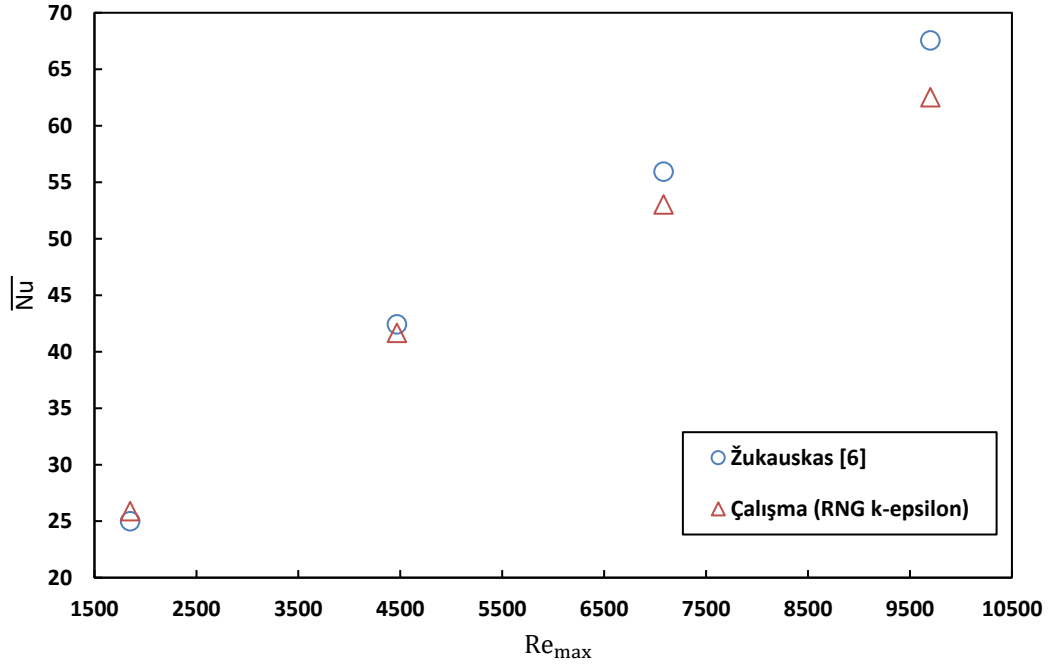
ifadesi ile hesaplanır. Žukauskas [6] tarafından sunulan Maksimum Reynolds sayısı $10 - 2 \times 10^5$ aralığında geçerli bağıntı Eş. (26)'da verilmiştir.

$$\overline{Nu} = C_1 Re_{\max}^m Pr^{0,36} \left(\frac{Pr}{Pr_{\text{duvar}}} \right)^{0,25} \quad (26)$$

Burada akış boyunca boru sayısının (N_L) 20'den fazla olduğu kabulü yapılmıştır. Çalışmada, boru sayısının dört olması nedeniyle, Žukauskas [6] tarafından sunulan düzeltme katsayısı olarak 0,89 değeri kullanılmıştır. C_1 ve m katsayıları için sırasıyla 0,34 ve 0,60 değerleri kullanılmıştır. Ortalama Nusselt sayısı (\overline{Nu}) Eş. (27) kullanılarak hesaplanmıştır.

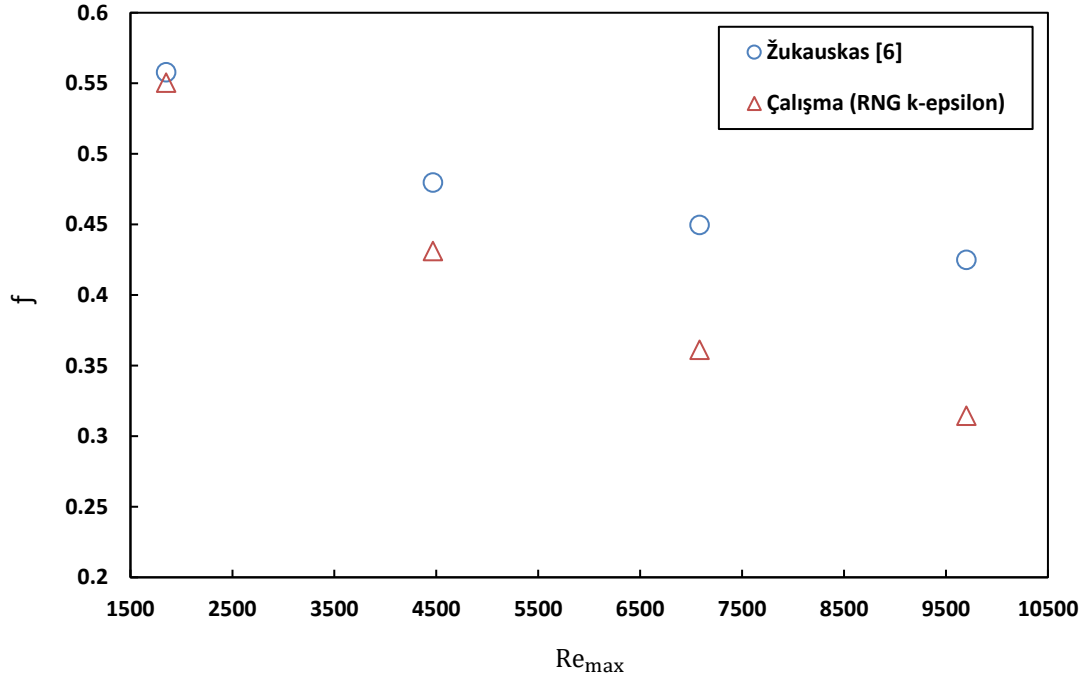
$$\overline{Nu} = 0,89 0,34 Re_{\max}^{0,60} Pr^{0,36} \left(\frac{Pr}{Pr_{\text{duvar}}} \right)^{0,25} \quad (27)$$

Ortalama Nusselt sayısının (\overline{Nu}) maksimum Reynolds sayısına göre değişimi, Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Ortalama Nusselt sayısının maksimum Reynolds sayısı ile değişimi

Sürtünme faktörünün (f) maksimum Reynolds sayısına göre değişimi, Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Sürtünme faktörünün maksimum Reynolds sayısı ile değişimi

Deneyel veriler ile bu çalışmada elde edilen sonuçlar arasındaki fark Tablo 7'de gösterilmiştir. Žukauskas [6] tarafından sunulan deneysel veriler ile **RNG k – ε** modeli sonuçları uyumlu olduğundan bundan sonraki çalışmalarda kullanılan modelin doğru sonuçlar vereceği kabul edilmiştir.

Tablo 7. Doğrulama çalışmasının Žukauskas [6] tarafından sunulan deneysel sonuçlara göre farkı

Re _{max}	Nu	f
	Fark (%)	
1850	3,9391	5,1518
4467	-1,0973	-5,8461
7083	-4,7143	-16,0177

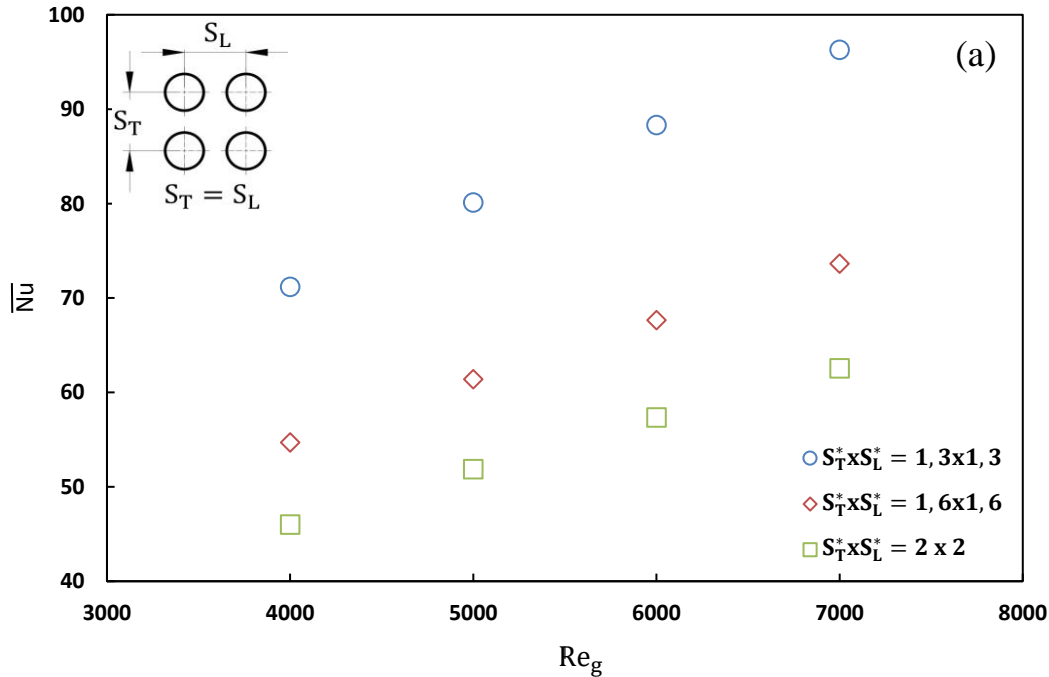
3. Bulgular

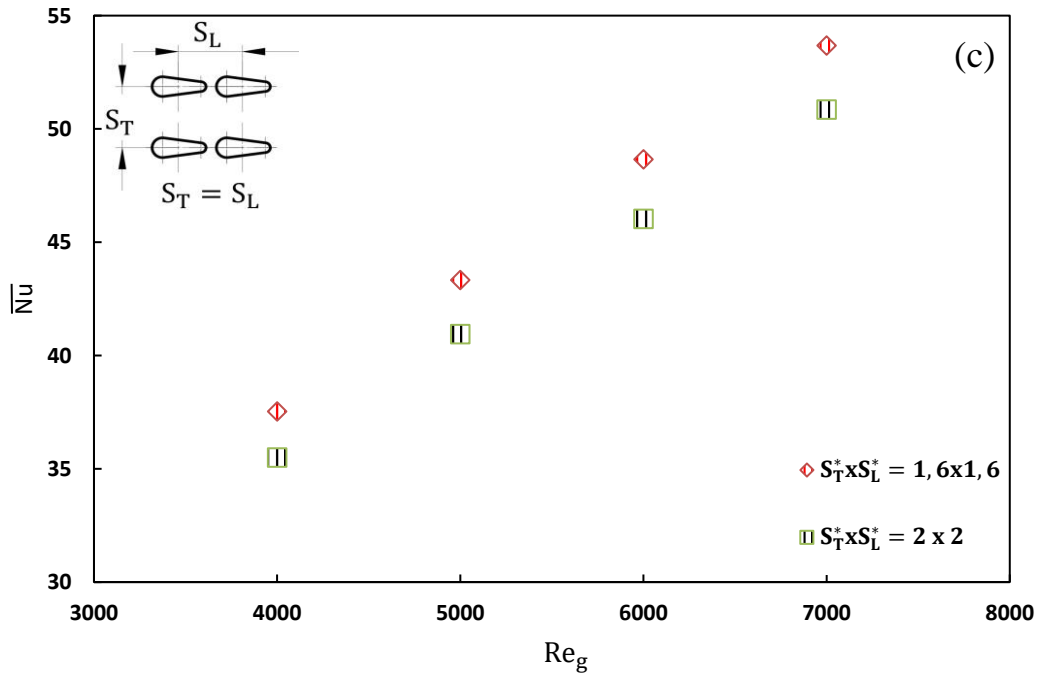
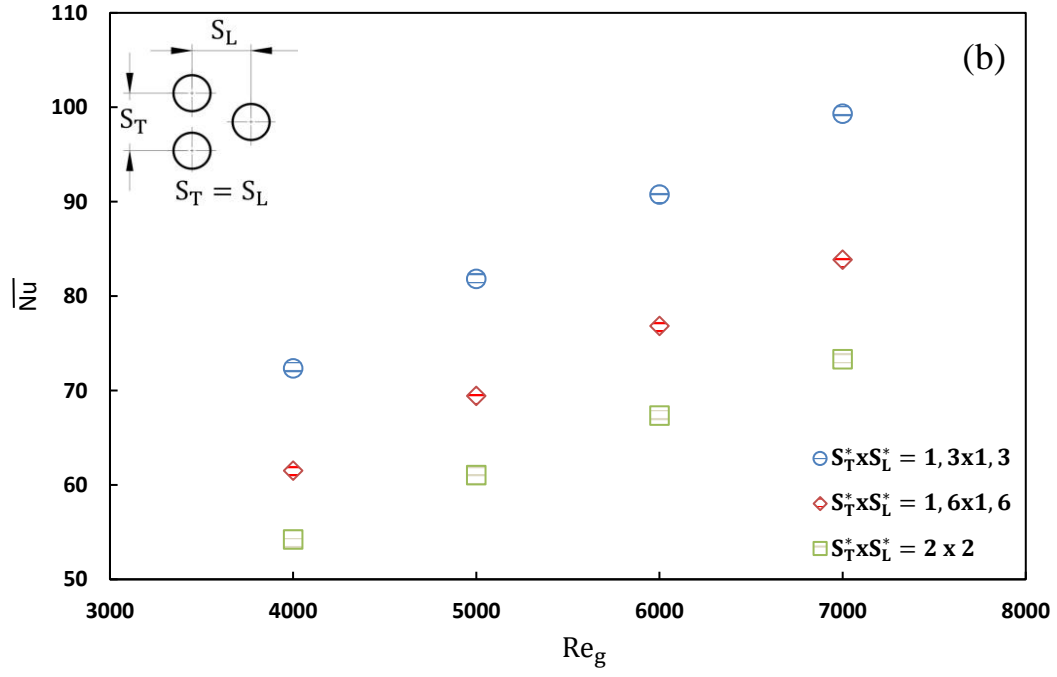
Bu çalışmada, giriş Reynolds sayısı 4000, 5000, 6000, 7000 değerleri için dört farklı durumda ısı transferi, sürtünme faktörü, entropi üretimi ve alan uyum faktörü incelenmiştir. Çalışmada kullanılan enine ve boyuna boyutsuz adım oranı değerleri Tablo 7'de sunulmuştur. Düzgün sıralı kanat şekilli boru demetinin çalışıldığı durumda geometrik sınırlama nedeniyle 1,3x1,3 boyutsuz adım oranında inceleme yapılamamıştır.

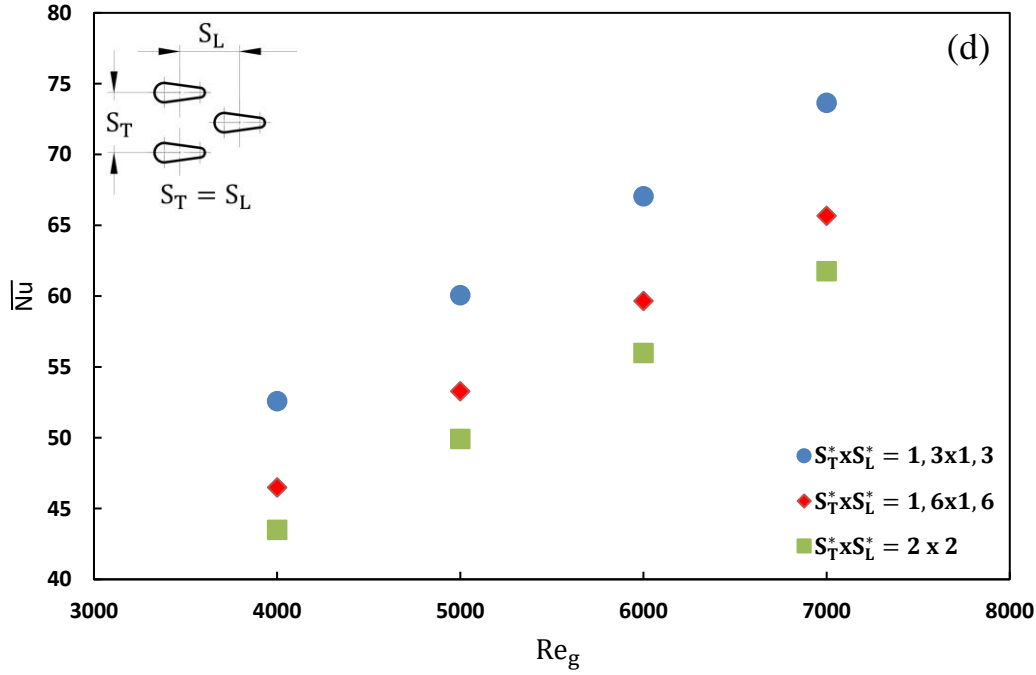
Tablo 7. Bu çalışmada kullanılan $S_T^* \times S_L^*$ değerleri

$S_T^* \times S_L^*$	Durum a	Durum b	Durum c	Durum d
	Düzgün sıralı dairesel şekilli boru demeti	Kaydırılmış sıralı dairesel şekilli boru demeti	Düzgün sıralı kanat şekilli boru demeti	Kaydırılmış sıralı kanat şekilli boru demeti
1,3x1,3	x	x	-	x
1,6x1,6	x	x	x	x
2x2	x	x	x	x

Çalışılan durumlar ve 1,3x1,3, 1,6x1,6, 2x2 boyutsuz adım oranı değerleri için giriş Reynolds sayısı ile Şekil 7'de ortalama Nusselt sayısının (\overline{Nu}), Şekil 8'de sürtünme faktörünün (f), Şekil 9'da entropi üretiminin (\dot{S}_{gen}) ve Şekil 10'da alan uyum faktörünün (A_{GF}) değişimi sunulmuştur. Ortalama Nusselt sayıları her bir durum ve boyutsuz adım oranında beklenildiği gibi en yüksek giriş Reynolds sayısı değerinde ($Re_g = 7000$) elde edilmiştir. Aynı boyutsuz adım oranı değerlerinde akışın geçtiği kesitlerin boyutlarının daha büyük olması sebebi ile kanat şekilli boru demetlerinde daha düşük ortalama Nusselt sayıları elde edilmiş olup çalışılan giriş Reynolds sayısı ve boyutsuz adım oranı değerlerinde, kanat şekilli boru kullanımı ile ortalama Nusselt sayısı dairesel şekilli boru kullanımı durumlarına göre arttırılamamıştır. En düşük ortalama Nusselt sayısı değerleri, düzgün sıralı kanat şekilli boru demetlerinde elde edilmiştir. $Re_g = 7000$ ve boyutsuz adım oranı 1,6x1,6 iken \overline{Nu} değeri en yüksek kaydırılmış sıralı dairesel şekilli boru demeti için 83,86 iken kaydırılmış sıralı kanat şekilli boru demeti için %24,06 azalış ile 63,68 olarak gerçekleşmiştir. $Re_g = 7000$ ve boyutsuz adım oranı 1,6x1,6 iken kaydırılmış sıralı dairesel şekilli boru demeti kullanımının düzgün sıralı dairesel şekilli boru demeti kullanımına göre Ortalama Nusselt sayısı değerlerinde %12,18 artışa, kaydırılmış sıralı kanat şekilli boru demeti kullanımının düzgün sıralı kanat şekilli boru demeti kullanımına göre ise %18,26 artışa neden olmuştur. En yüksek \overline{Nu} değeri $Re_g = 7000$ ve 1,3x1,3 boyutsuz adım oranı değerinde kaydırılmış sıralı dairesel şekilli boru demeti durumunda 99,32, en düşük \overline{Nu} değeri $Re_g = 4000$ ve geometrik olarak mümkün olan 1,6x1,6 boyutsuz adım oranı değerinde düzgün sıralı kanat şekilli boru demeti durumunda 37,53 olarak gerçekleşmiştir.

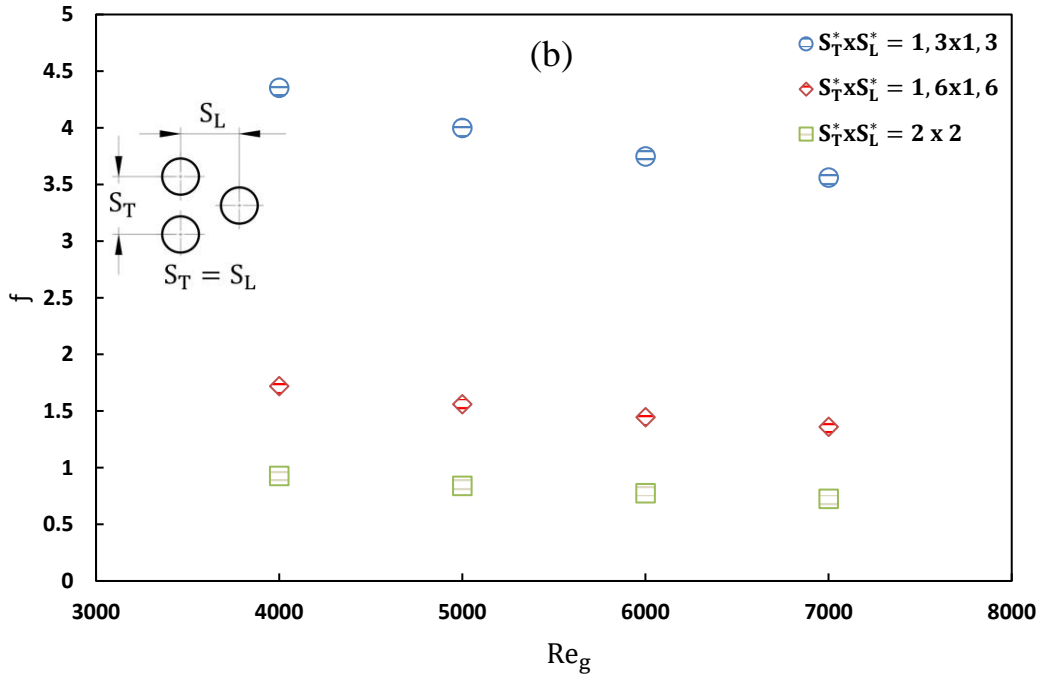
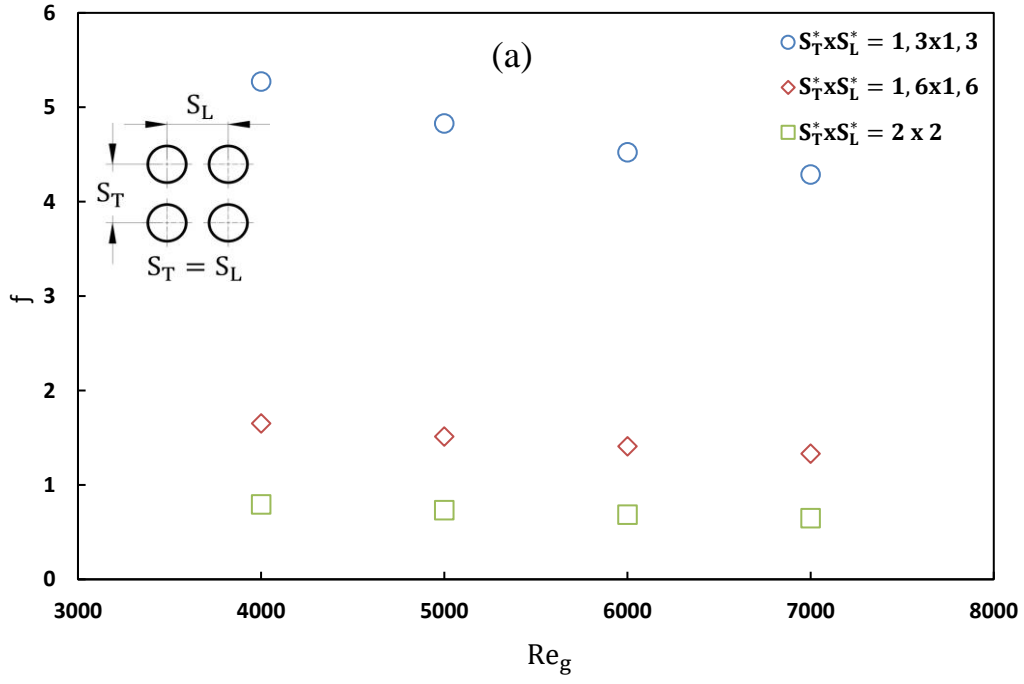


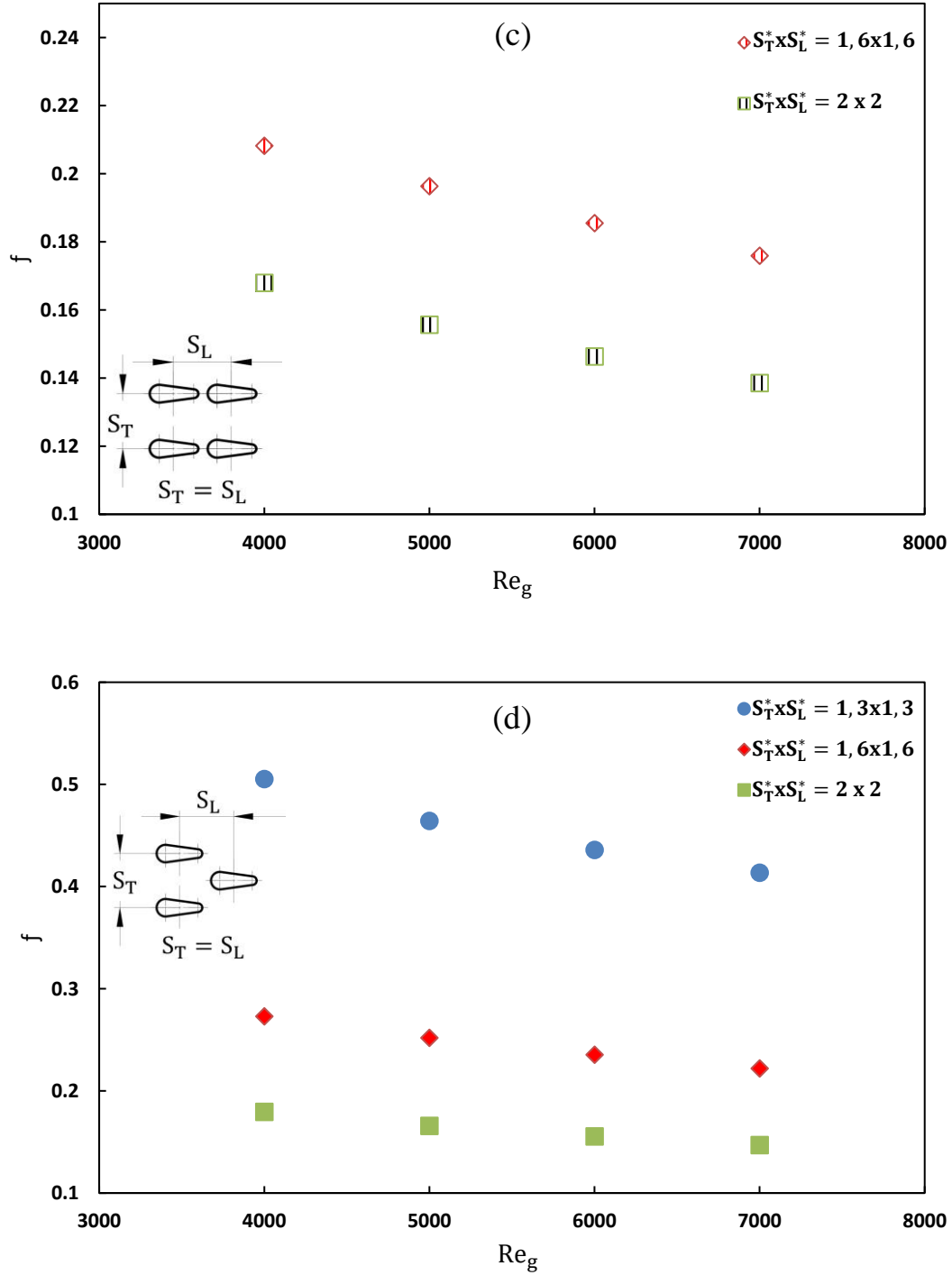




Şekil 7. 1,3x1,3, 1,6x1,6, 2x2 boyutsuz adım oranı değerleri için Ortalama Nusselt sayısının giriş Reynolds sayısı ile değişimi (a) düzgün sıralı dairesel şekilli boru demetinde (b) kaydırılmış sıralı dairesel şekilli boru demetinde (c) düzgün sıralı kanat şekilli boru demetinde (d) kaydırılmış sıralı kanat şekilli boru demetinde

Kanat şekilli boru kullanımı ile sürtünme faktörü değerleri azaltılmıştır. En düşük f değerleri düzgün sıralı kanat şekilli boru demetlerinde elde edilirken; 1,3x1,3 boyutsuz adım oranı değerleri için düzgün sıralı dairesel şekilli boru demetinde, 1,6x1,6 ve 2x2 boyutsuz adım oranı değerlerinde ise kaydırılmış sıralı dairesel şekilli boru demetlerinde f değerleri en yüksektir. En düşük sürtünme faktörü değerleri her bir durum ve boyutsuz adım oranında beklenildiği gibi en yüksek giriş Reynolds sayısı değerinde ($Re_g = 7000$) elde edilmiştir. $Re_g = 7000$ ve boyutsuz adım oranı 1,6x1,6 iken f değeri en düşük düzgün sıralı kanat şekilli boru demeti için 0,18 iken en yüksek düzgün sıralı dairesel şekilli boru demeti için 7,4 kat artış ile 1,33 olarak gerçekleşmiştir. $Re_g = 7000$ ve boyutsuz adım oranı 1,6x1,6 iken düzgün sıralı dairesel şekilli boru demeti kullanımının kaydırılmış sıralı dairesel şekilli boru demeti kullanımına göre sürtünme faktörü değerinde %2,2 azalışa, düzgün sıralı kanat şekilli boru demeti kullanımının kaydırılmış sıralı kanat şekilli boru demeti kullanımına göre ise %18,18 azalışa neden olmuştur. En yüksek f değeri $Re_g = 4000$ ve 1,3x1,3 boyutsuz adım oranı değerinde düzgün sıralı dairesel şekilli boru demeti durumunda 5,27, en düşük \overline{Nu} değeri $Re_g = 7000$ ve geometrik olarak mümkün olan 2x2 boyutsuz adım oranı değerinde düzgün sıralı kanat şekilli boru demeti durumunda 0,14 olarak gerçekleşmiştir.

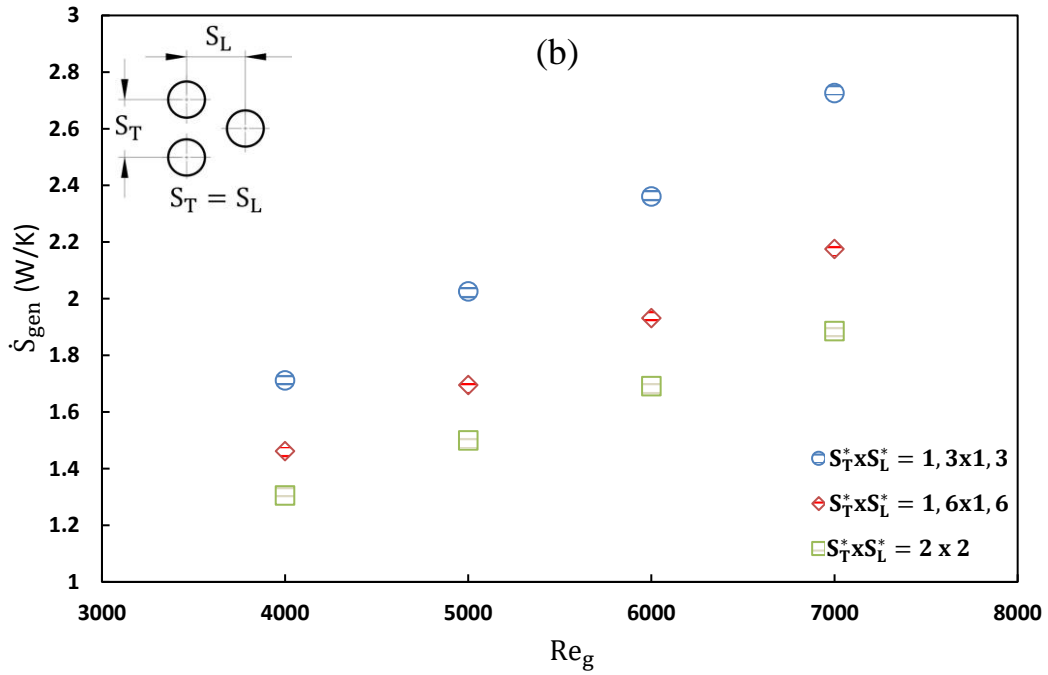
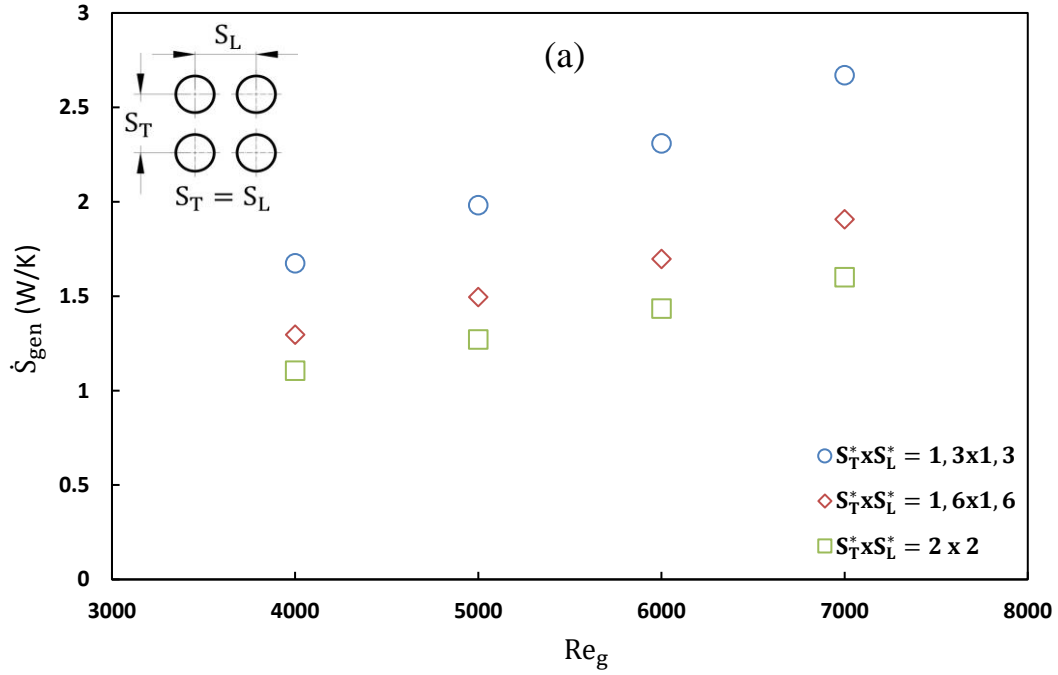


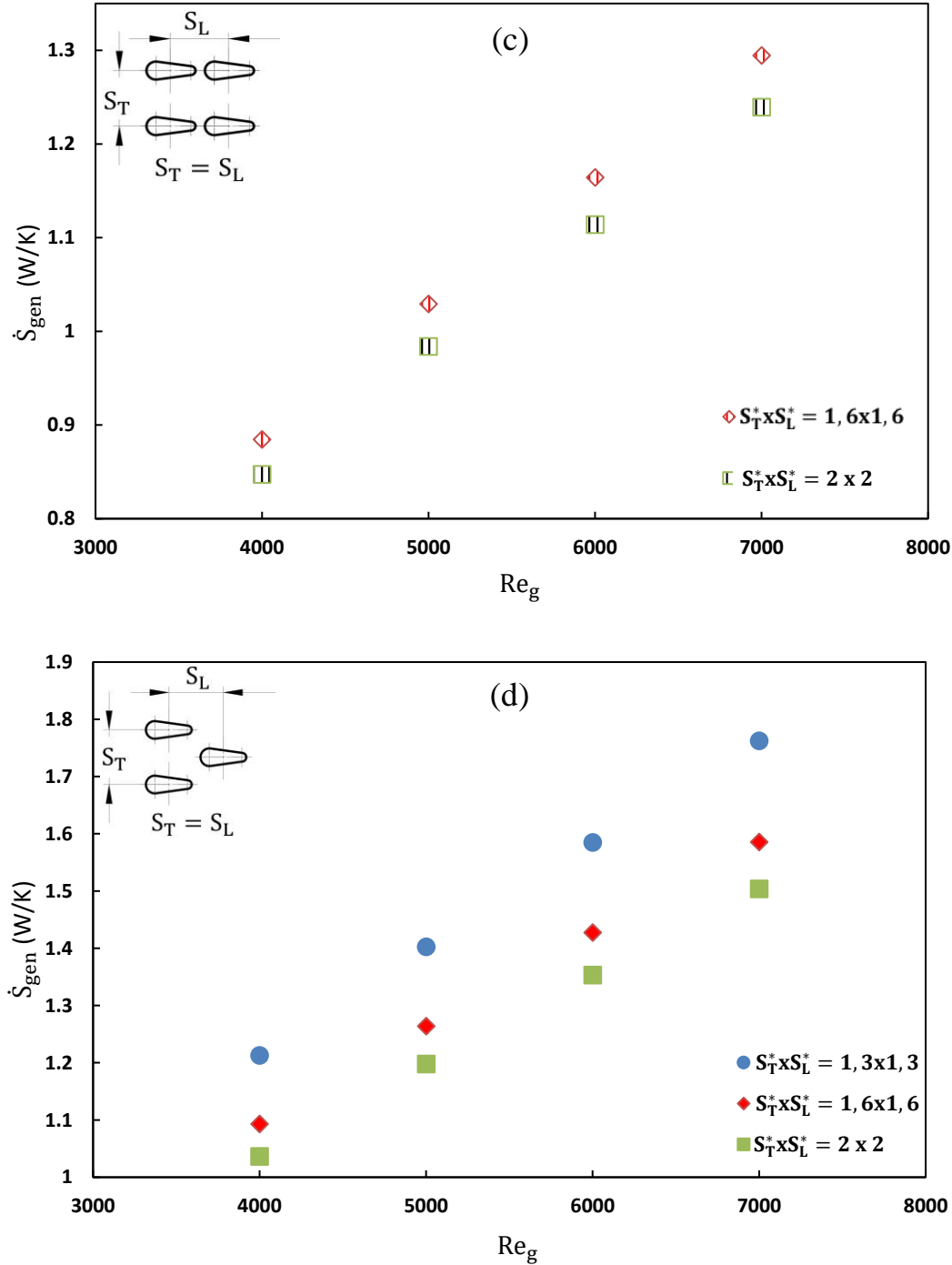


Şekil 8. 1,3x1,3, 1,6x1,6, 2x2 boyutsuz adım oranı değerleri için sürtünme faktörünün giriş Reynolds sayısı ile değişimi (a) düzgün sıralı dairesel şekilli boru demetinde (b) kaydırılmış sıralı dairesel şekilli boru demetinde (c) düzgün sıralı kanat şekilli boru demetinde (d) kaydırılmış sıralı kanat şekilli boru demetinde

Kanat şekilli boru kullanımı ile entropi üretimi azaltılmıştır. En düşük entropi üretimi düzgün sıralı kanat şekilli boru demetlerinde elde edilirken, kaydırılmış sıralı dairesel şekilli boru demetlerinde ise entropi üretim değerleri en yüksektir. En yüksek entropi üretimi her bir durum ve boyutsuz adım oranında beklenildiği gibi en yüksek giriş Reynolds sayısı değerinde ($Re_g = 7000$) gerçekleşmiştir. $Re_g = 4000$ ve boyutsuz adım oranı 1,6x1,6 iken en düşük entropi üretim değeri düzgün sıralı kanat şekilli boru demeti için 0,89 W/K iken kaydırılmış sıralı dairesel şekilli boru demeti için %64 artış ile 1,46 olarak gerçekleşmiştir. $Re_g = 4000$ ve boyutsuz adım oranı 1,6x1,6 iken düzgün sıralı dairesel şekilli boru demeti kullanımının kaydırılmış sıralı dairesel şekilli boru demeti kullanımına göre entropi üretiminde %12,31 azalışa, düzgün sıralı kanat şekilli boru demeti kullanımının kaydırılmış sıralı kanat şekilli boru demeti kullanımına göre ise %23,60 azalışa neden olmuştur. En yüksek entropi üretimi $Re_g =$

7000 ve 1,3x1,3 boyutsuz adım oranı değerinde kaydırılmış sıralı dairesel şekilli boru demeti durumunda 2,73 W/K, en düşük entropi üretimi ve geometrik olarak mümkün olan 1,6x1,6 boyutsuz adım oranı değerinde düzgün sıralı kanat şekilli boru demeti durumunda 0,89 W/K olarak gerçekleşmiştir.

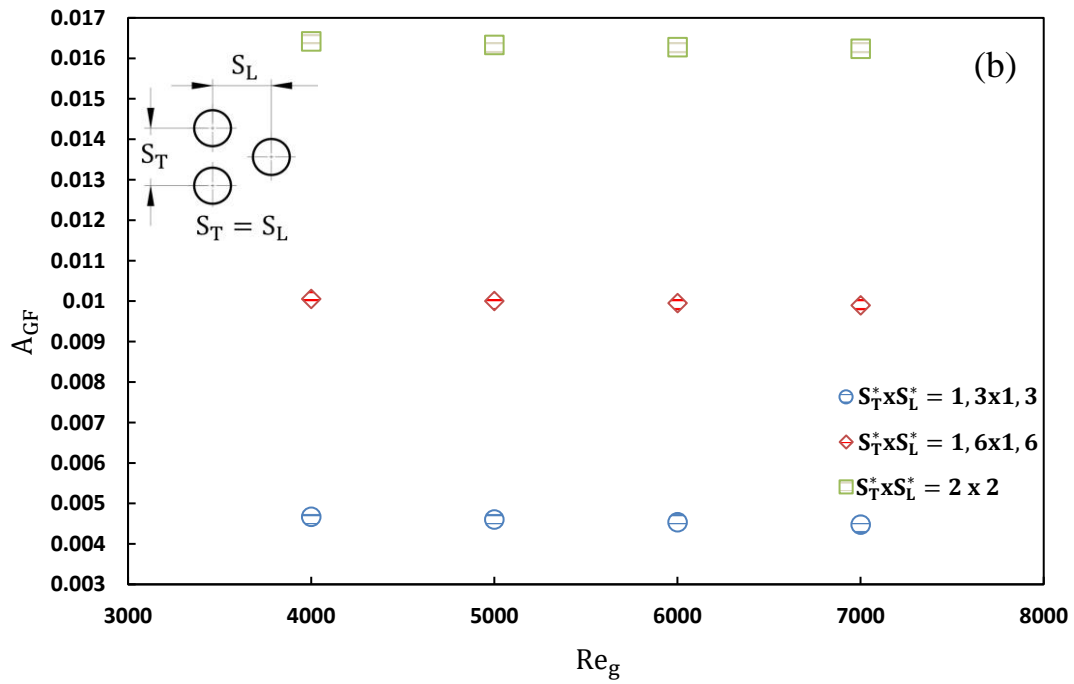
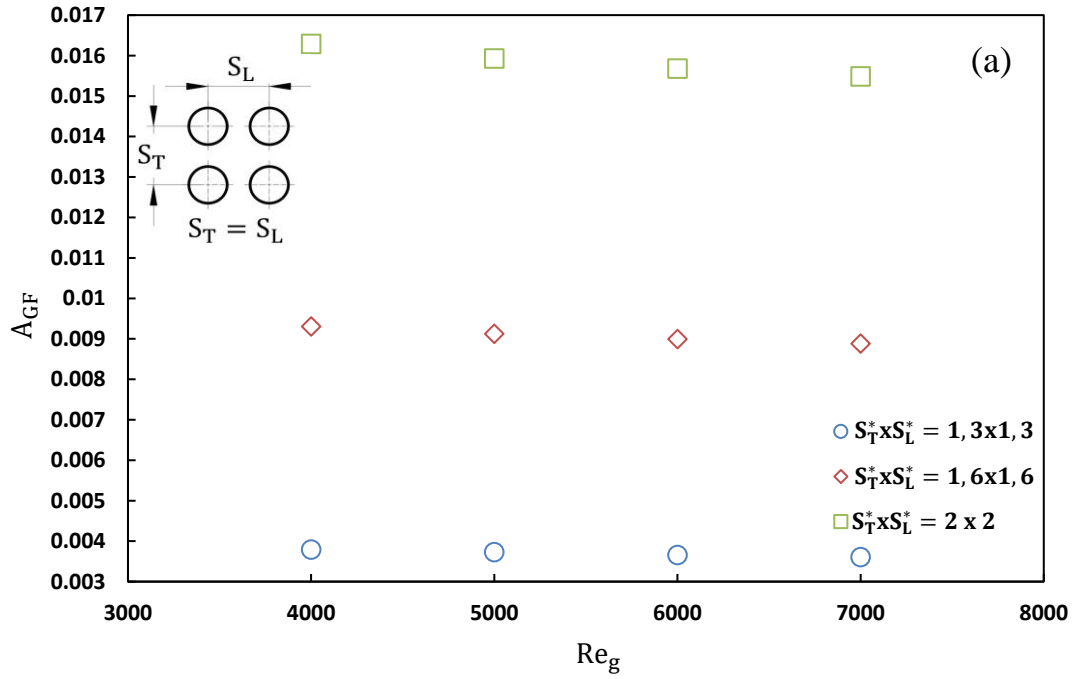


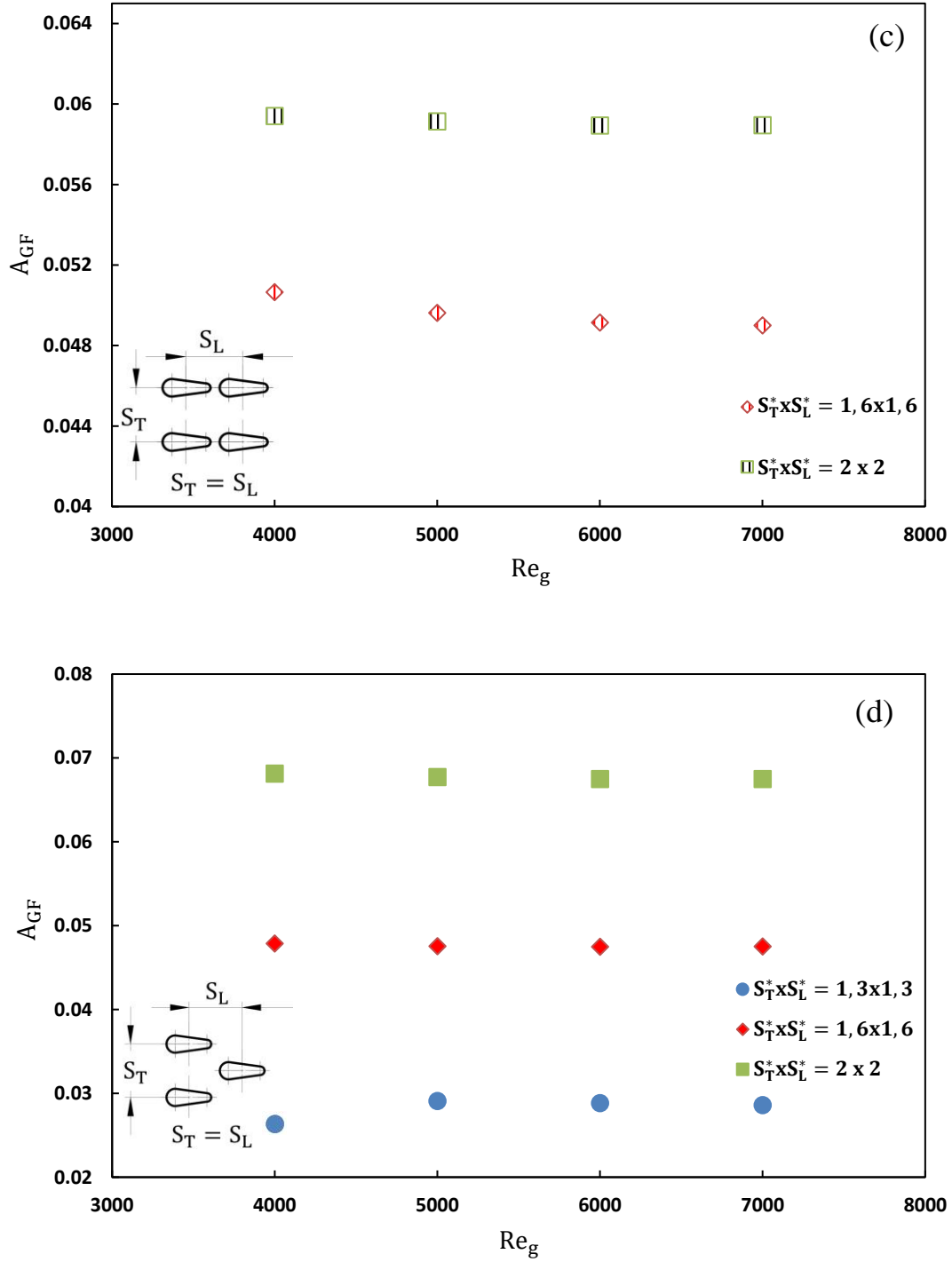


Şekil 9. 1,3x1,3, 1,6x1,6, 2x2 boyutsuz adım oranı değerleri için entropi üretiminin giriş Reynolds sayısı ile değişimi (a) düzgün sıralı dairesel şekilli boru demetinde (b) kaydırılmış sıralı dairesel şekilli boru demetinde (c) düzgün sıralı kanat şekilli boru demetinde (d) kaydırılmış sıralı kanat şekilli boru demetinde

Taşıyım ile olan ısı transferinin yüksek ve sürtünme faktörünün düşük olmasının sonucu olarak düşük işletme maliyetli ısı transferi gerçekleşir. Bu durum alan uyum faktörünün büyüklüğü ile tanımlanır. Kanat şekilli boru kullanımı ile alan uyum faktörü artmıştır. En düşük alan uyum faktörü değerleri düzgün sıralı dairesel şekilli boru demetlerinde elde edilirken, kaydırılmış sıralı kanat şekilli boru demetlerinde alan uyum faktörü değerleri en yüksektir. En büyük alan uyum faktörü değerleri her bir durum ve boyutsuz adım oranında en düşük giriş Reynolds sayısı değerinde ($Re_g = 4000$) elde edilmiştir. $Re_g = 4000$ ve boyutsuz adım oranı 2x2 iken alan uyum faktörü değeri en yüksek kaydırılmış sıralı kanat şekilli boru demeti için 0,068 iken kaydırılmış sıralı dairesel şekilli boru demeti için 4,25 kat azalış ile 0,016 olarak gerçekleşmiştir. $Re_g = 4000$ ve boyutsuz adım oranı 2x2 iken kaydırılmış sıralı dairesel şekilli boru demeti kullanımının düzgün sıralı dairesel şekilli boru demeti kullanımına göre alan uyum faktörü değerinde %0,81 artışa, kaydırılmış sıralı kanat şekilli boru demeti

kullanımının düzgün sıralı kanat şekilli boru demeti kullanımına göre ise %15,58 artışa neden olmuştur. En yüksek alan uyum faktörü değeri $Re_g = 4000$ ve 2×2 boyutsuz adım oranı değerinde kaydırılmış sıralı kanat şekilli boru demeti durumunda 0,068, en düşük A_{GF} değeri $Re_g = 7000$ ve $1,3 \times 1,3$ boyutsuz adım oranı değerinde düzgün sıralı dairesel şekilli boru demeti durumunda 0,0036 olarak gerçekleşmiştir.



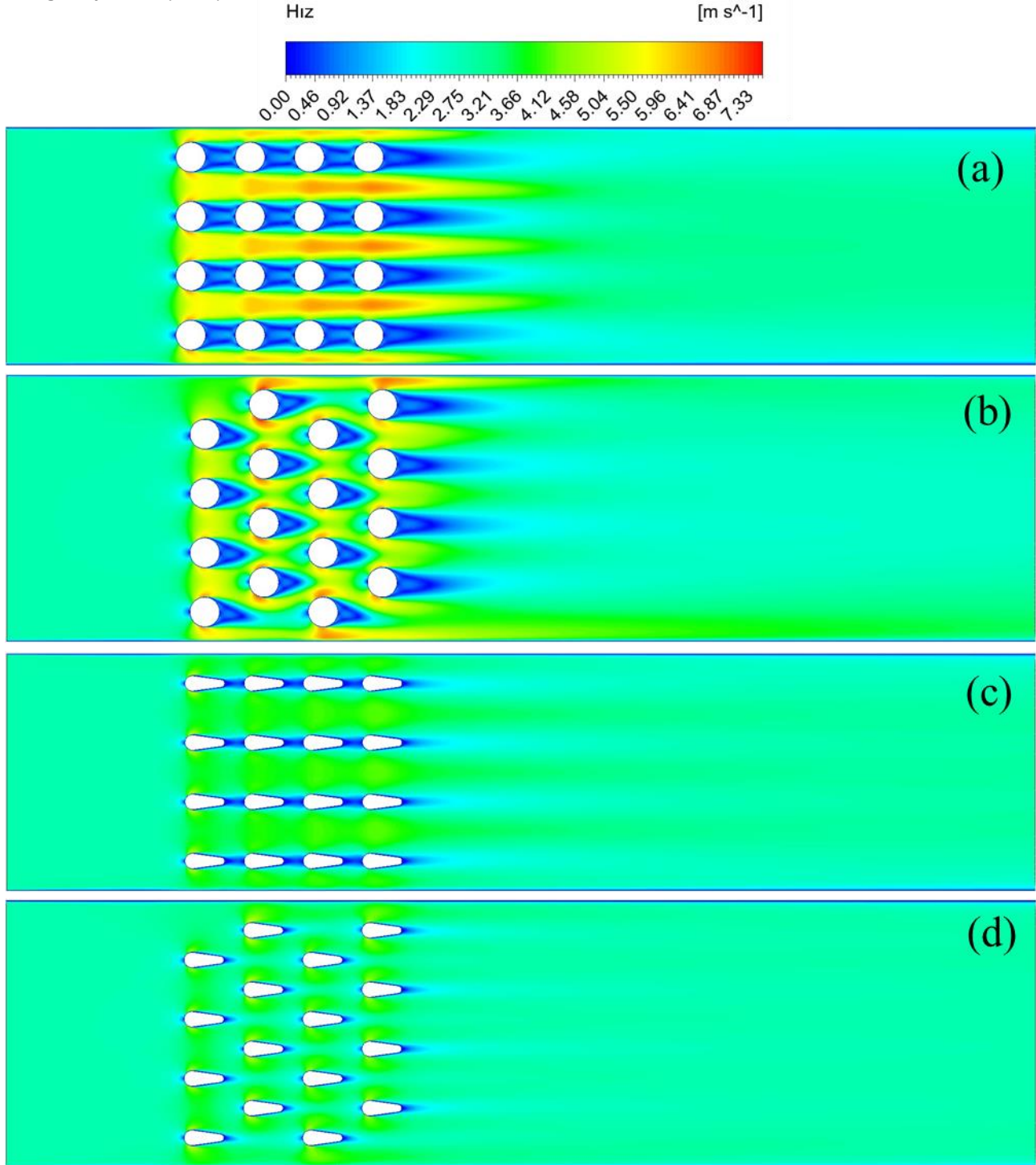


Şekil 10. 1,3x1,3, 1,6x1,6, 2x2 boyutsuz adım oranı değerleri için alan uyum faktörünün giriş Reynolds sayısı ile değişimi (a) düzgün sıralı dairesel şekilli boru demetinde (b) kaydırılmış sıralı dairesel şekilli boru demetinde (c) düzgün sıralı kanat şekilli boru demetinde (d) kaydırılmış sıralı kanat şekilli boru demetinde

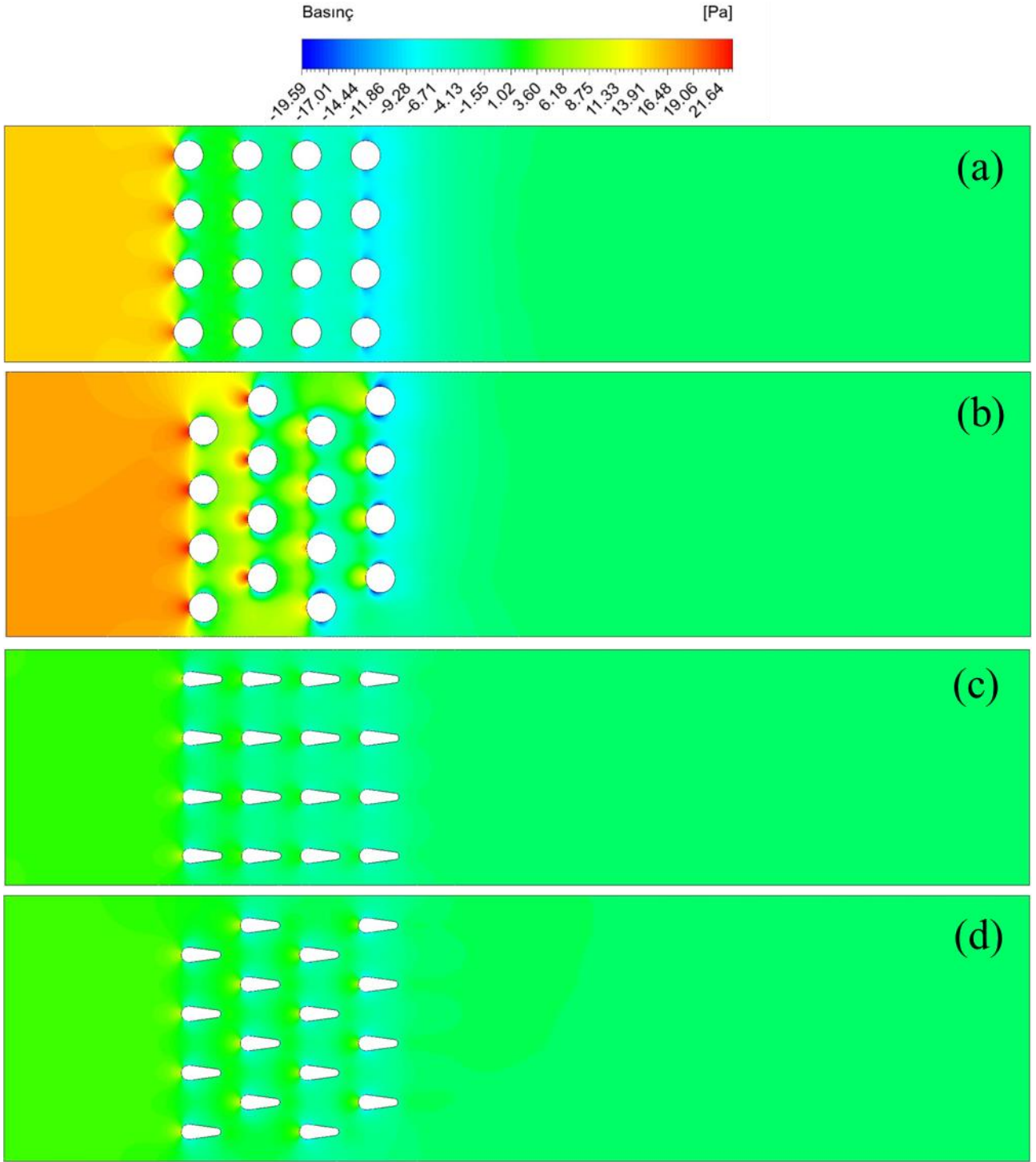
Hız konturlarının düzgün sıralı ve kaydırılmış sıralı dizilişe sahip dairesel ve kanat şekilli boru demetleri için $Re_g = 4000$ ve $S_T^* \times S_L^* = 2 \times 2$ 'de karşılaştırılmaları Şekil 11'de gösterilmektedir. Akış art iz bölgesinde hız değerleri dairesel şekilli boru demetlerinde geometrik olarak akışa daha uygun kanat şekilli boru demetlerine göre daha geniş alanda neredeyse durma noktasına gelmektedir. Akışın durma noktasına geldiği alan, hava akışının gerçekleştiği kesit alanındaki daralma nedeniyle maksimum hız değerlerinin daha yüksek olduğu kaydırılmış sıralı dizilişe sahip boru demetlerinde düzgün sıralı boru demetlerine göre daha küçük meydana gelmektedir.

Basınç konturlarının düzgün sıralı ve kaydırılmış sıralı dizilişe sahip dairesel ve kanat şekilli boru demeti için $Re_g = 4000$ ve $S_T^* \times S_L^* = 2 \times 2$ 'de karşılaştırılmaları Şekil 12'de gösterilmektedir. Düzgün sıralı kanat şekilli boru demeti kullanımı akışa engel alanı azalttığından önemli ölçüde basınç düşümünü azaltmıştır. Bu durum entropi üretimindeki azalmanın temel nedenidir.

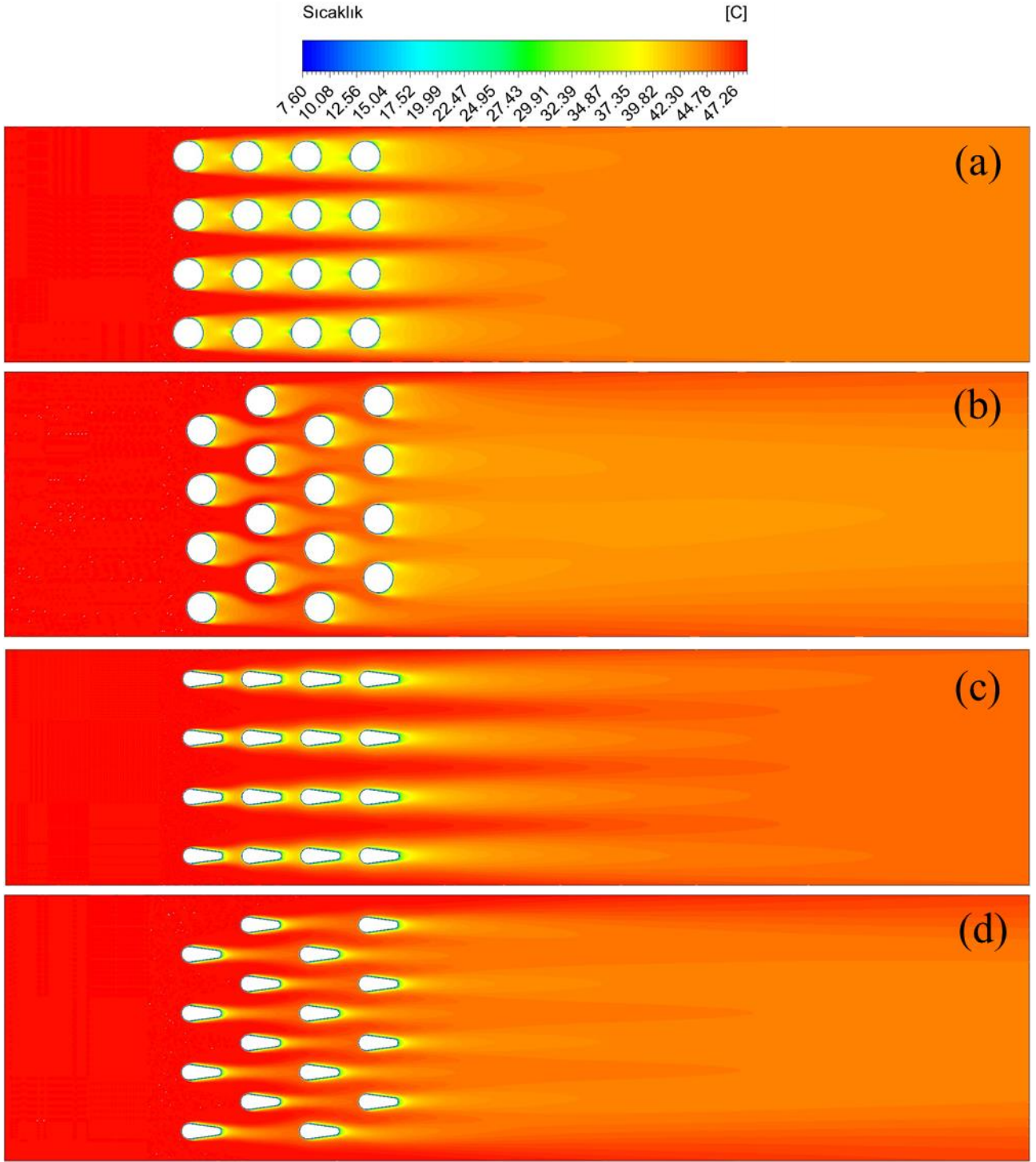
Sıcaklık konturlarının düzgün sıralı ve kaydırılmış sıralı dizilişe sahip dairesel ve kanat şekilli boru demeti için $Re_g = 4000$ ve $S_T^* \times S_L^* = 2 \times 2$ 'de karşılaştırılmaları Şekil 13'te gösterilmektedir. Hava akışının gerçekleştiği kesit alanındaki daralma sebebiyle akış hızındaki artışa bağlı olarak daha ince ısıl tabaka oluşmaktadır. Tabaka kalınlığındaki azalma akışın boru yüzeylerinden ayrılma hızını arttırdığı ve bu sebeple daha yüksek ısı transferi ve Ortalama Nusselt Sayısı oluşumuna neden olmuştur. Bu durum hava akış kesit alanındaki daralmanın yüksek olduğu kaydırılmış dizilişe sahip dairesel boru demetinde daha belirgindir.



Şekil 11. Hız konturlarının (a) düzgün sıralı dairesel şekilli boru demeti (b) kaydırılmış sıralı dairesel şekilli boru demeti (c) düzgün sıralı kanat şekilli boru demeti (d) kaydırılmış sıralı kanat şekilli boru demeti için $S_T^* \times S_L^* = 2 \times 2$ ve $Re_g = 4000$ değerlerinde karşılaştırılması



Şekil 12. Basınç konturlarının (a) düzgün sıralı dairesel şekilli boru demeti (b) kaydırılmış sıralı dairesel şekilli boru demeti (c) düzgün sıralı kanat şekilli boru demeti (d) kaydırılmış sıralı kanat şekilli boru demeti için $S_T^* \times S_L^* = 2 \times 2$ ve $Re_g = 4000$ değerlerinde karşılaştırılması



Şekil 13. Sıcaklık konturlarının (a) düzgün sıralı dairesel şekilli boru demeti (b) kaydırılmış sıralı dairesel şekilli boru demeti (c) düzgün sıralı kanat şekilli boru demeti (d) kaydırılmış sıralı kanat şekilli boru demeti için $S_T^* \times S_L^* = 2 \times 2$ ve $Re_g = 4000$ değerlerinde karşılaştırılması

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, düzgün sıralı ve kaydırılmış sıralı dizilişe sahip boru demetlerinde dairesel ve kanat şekilli boru kullanımına ait dört durum sayısal olarak çalışılmıştır. Böylece, çapraz akışta kanat şekilli boru kullanımının alan uyum faktörü, entropi üretimi, basınç düşümü ve ısı transferine olan etkileri detaylıca tartışılmıştır.

- Çalışılan geometrik parametreler ve giriş Reynolds sayılarında, kanat şekilli boru kullanımı ile elde edilen ortalama Nusselt sayısı dairesel olana göre daha düşüktür. Örneğin, $Re_g = 7000$ ve $S_T^* \times S_L^* = 1,6 \times 1,6$ 'da kaydırılmış sıralı boru demetlerin en yüksek \overline{Nu} değeri dairesel şekilli boru demetinde 83,86 iken en düşük \overline{Nu} kanat şekilli boru demetinde 65,68 olarak elde edilmiştir. Bu durumda \overline{Nu} %21,68 azalmıştır.

- Kanat şekilli boru kullanımı ile elde edilen sürtünme faktörü dairesel olana göre daha düşüktür. Örneğin, $Re_g = 7000$ ve $S_T^* \times S_L^* = 1,6 \times 1,6$ 'da düzgün sıralı boru demetlerinde f değeri dairesel şekilli boru demetinde 1,33 iken kanat şekilli boru demetinde 0,18 olarak elde edilmiştir. Bu durumda f %86,47 azalmıştır.
- Kanat şekilli boru kullanımı ile elde edilen entropi üretimi dairesel olana göre daha düşüktür. Örneğin, $Re_g = 7000$ ve $S_T^* \times S_L^* = 1,6 \times 1,6$ 'da düzgün sıralı boru demetlerinde \dot{S}_{gen} değeri dairesel şekilli boru demetinde 1,91 W/K iken kanat şekilli boru demetinde 1,30 W/K olarak elde edilmiştir. Bu durumda \dot{S}_{gen} %31,94 azalmıştır.
- Kanat şekilli boru kullanımı ile elde edilen alan uyum faktörü dairesel olana göre daha yüksektir. Örneğin, $Re_g = 7000$ ve $S_T^* \times S_L^* = 1,6 \times 1,6$ 'da düzgün sıralı boru demetlerinde A_{GF} değeri dairesel şekilli boru demetinde 0,0089 iken kanat şekilli boru demetinde 0,049 olarak elde edilmiştir. Bu durumda A_{GF} %450,46 artmıştır.

Tesekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK BİDEB 2218 Yurtiçi Doktora Sonrası Araştırma Burs Programı tarafından 121C377 proje numarası ile ve TÜBİTAK ARDEB 1001 Araştırma Programı tarafından 123M484 proje numarası ile desteklenmektedir.

Kaynakça

- [1] Hilpert, R., 1933. Waermeabgabe Von geheizten Rohren and Graehten. Forschung Auf Dem Gebeit Des Ingenieurwesens, 4(1933), 1027-1038.
- [2] Grimison, E. D., 1937. Correlation and Utilization of New Data on Flow Resistance and heat Transfer for Cross Flow of Gases over Tube Banks. Trans. ASME., 59(1937), 583-594.
- [3] Bergelin, O. P., Brown, G. A., Hull, H. L., Sullivan, F. W., 1950. Heat Transfer and Fluid Friction during Viscous Flow across Banks of Tubes-III: A Study of Tube Spacing and Tube Size. Trans. A. Sot. Mech. Engrs., 72(1950), 881-888.
- [4] Bergelin, O. P., Brown, G. A., Doberstein, S. C., 1952. Heat Transfer and Fluid Friction during Flow across Banks of Tubes-IV: A Study of the Transition Zone between Viscous and Turbulent Row. Trans. A. Sot. Mech. Engrs., 74(1952), 953-960.
- [5] Žukauskas, A. 1972. Heat Transfer from Tubes in Crossflow. Advances in Heat Transfer, 8(1972), 93-160.
- [6] Žukauskas, A., Ulinskas, R., 1985. Efficiency parameters for heat transfer in tube banks. Heat Transfer Engineering, 6(1985), 19-25.
- [7] El-Shaboury, A. M. F., Ormiston, S. J., 2005. Analysis of Laminar Forced Convection of Air Crossflow in In-Line Tube Banks with Nonsquare Arrangements. Numerical Heat Transfer, 48(2005), 99-126.
- [8] Khan, W. A., Culham, J. R., & Yovanovich, M. M., 2006. Convection heat transfer from tube banks in crossflow: Analytical Approach. International Journal of Heat and Mass Transfer, 49(2006), 4831-4838.
- [9] Gaddis, E. S., 2010. Pressure Drop of Tube Bundles in Cross Flow. VDI Heat Atlas, Berlin (2010), 1076-1091.
- [10] Yılmaz, A., Yılmaz, T., 2016. Çapraz Akışlı Paralel Borulu Boru Demetinde Entropi Üretimini Analitik ve Deneysel Olarak İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 31(2016), 223-230.
- [11] Horvart, A., Leskovar, M., Mavko, B., 2006. Comparison of Heat Transfer Condition in Tube Bundle Cross-Flow for Different Tube Shapes. International Journal of Heat and Mass Transfer, 49(2006), 1027-1038.
- [12] Bayat, H., Lavasani, A. M., Maarefdoost, T., 2014. Experimental Study of Thermal-Hydraulic Performance of Cam-Shaped Tube Bundle with Staggered Arrangement. Energy Conversion and Management, 85(2014), 470-476.
- [13] Mangrulkar, C. K., Dhoble, A. S., Deshmukh, A. R., Mandavgane, S. A., 2017. Numerical Investigation of Heat transfer and Friction Factor Characteristics from In-Line Cam Shaped Tube Bank in Crossflow. Appl. Therm. Eng., 110(2017), 521-538.
- [14] Khan, W. A., Culham, J. R., Yovanovich, M. M., 2004. Fluid Flow and Heat Transfer from Elliptical Cylinder: Analytical Approach. 37th AIAA Thermophys. Conf., 19(2004).

- [15] Sayed Ahmed, S. A. E., Mesalhy O. M., Khass, T. M., Hassan, A. H. 2012. Parametric Study of Air Cooling Process via Water Cooled Bundle of Wing-Shaped Tubes. Egyptian International Journal of Engineering Sciences and Technology, 15(2012), 1172-1184.
- [16] Fluent, A. (2021). Ansys fluent theory guie. In ANSYS Inc., USA.
- [17] Kuru, M. N., Erdinç, M. T., Karasu, İ., Ünal, Ş. 2023. Boru Demeti Isı Değiştiricilerinde Farklı Boru Çapı Kullanımının Akış ve Isı Transferini İyileştirmeye Etkisi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 26(2023), 625-636.
- [18] Aslan, E., Taymaz, İ., Çakır, K., Eker Kahveci, E. 2023. Numerical and Experimental Investigation of Tube Bundle Heat Exchanger Arrangement Effect on Heat Transfer Performance In Turbulent Flows. Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 43(2023), 175-190.
- [19] Khan, W. A., Culham, J. R., Yovanovich, M. M. 2007. Optimal Design of Tube Banks in Crossflow Using Entropy Generation Minimization Method. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 21(2007), 372-378.

Semboller

A	boru demeti hava giriş alanı, m ²
A _{GF}	alan uyum faktörü
c _p	özgül ısı, kJ/kg. K
D	boru çapı, mm
D _e	eş değer boru çapı, mm
f	sürtünme katsayısı
k _{hava}	havanın ısı iletim katsayısı, W/m. K
m	kütleli debi, kg/s
N _L	boyuna doğrultudaki boru sayısı
N _T	dikine doğrultudaki boru sayısı
\overline{Nu}	ortalama Nusselt sayısı
P _{dc}	basınç düşüm sabiti
Pr	hava giriş Prandtl sayısı
Pr _{duvar}	boru yüzey Prandtl sayısı
q"	boru yüzeyindeki ısı akısı, W/m ²
Q	boru demetinden taşınım ile yapılan ısı transferi, W
S _D	diyagonal uzunluk, mm
Ş _{gen}	entropi üretimi, W/K
S _L	boyuna uzunluk, mm
S _L [*]	boyuna boyutsuz adım oranı
S _T	enine uzunluk, mm
S _T [*]	enine boyutsuz adım oranı
T _{duvar}	boru yüzey sıcaklığı, K
T _{giriş}	giriş sıcaklığı, K
T _{çıkış}	çıkış sıcaklığı, K
T _f	film sıcaklığı, K
THP	ısıl hidrolik verim
Re _g	giriş Reynolds sayısı
Re _{max}	maksimum Reynolds sayısı
V _g	ortalama giriş hızı, m/s
V _{max}	akış kesitinin minimum olduğu alandaki maksimum ortalama hız, m/s
ρ	yoğunluk, kg/m ³
μ	dinamik vizkozite, kg / m. s
ΔP	basınç düşümü, Pa
ΔT _{LM}	logaritmik ortalama sıcaklık farkı, K

Farklı Yönetmeliklerde Tanımlanan Etkin Kesit Rijitliklerinin Yapı Davranışına Etkisinin İncelenmesi

Onur Karaalioglu¹, Gökhan Dok², Hakan Öztürk³

¹ Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği, KOCAELİ

² Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği, SAKARYA

³ Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği, SAKARYA

(Alınış / Received: 23.03.2024, Kabul / Accepted: 03.07.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.08.2024)

Anahtar Kelimeler

Betonarme yapılar,
Etkin kesit rijitliği,
Doğrusal olmayan analiz

Öz: Bu çalışmada depreme dayanıklı yapı tasarımında kullanılan etkin kesit rijitliği değerleri için farklı tasarım yönetmeliklerinde tanımlanmış yaklaşımların, yapısal davranışa etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu kapsamda özellikle Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (TBDY 2018) kullanılan yukarıda bahsi geçen değerlerin güncel deneysel, nümerik ve analitik çalışmalarla uygunluğunun araştırılması amaçlanmıştır. Değerlendirme için tasarımı yapılan örnek sonlu eleman modelleri farklı etkin kesit rijitlik değerleri kullanılarak zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap yöntemi ile analiz edilmiştir. Çalışmada güncel tasarım yönetmeliklerinin gereksinimlerini sağlayan, 8 katlı, herhangi bir yapısal kusuru veya düzensizliği bulunmayan, üç boyutlu betonarme yapı modelleri 11 farklı kuvvetli yer hareketi kullanılarak değerlendirilmiştir. Nümerik analizlerden elde edilen sonuçların ortalaması alınarak analiz sonuçları Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018), Federation Internationale du Beton (FIB) Model Code 2010 ve bu alanda uluslararası kabul görmüş güncel çalışmalar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda etkin kesit rijitlikleri ile betonarme yapıda değişen kuvvet, yer değiştirme ve görelî kat ötelemesi talepleri ile yapıya ait dinamik karakteristikler incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre yapısal performans değerlendirmesinde kullanılan ve TBDY 2018'de belirlenen etkin kesit rijitliğine ait tanımlamaların güncellenmesi önerilmiştir.

Examining the Effect of Effective Section Stiffness Defined in Different Regulations on Structural Behavior

Keywords

Reinforced concrete
structures,
Effective cross-section
stiffness,
Nonlinear analysis

Abstract: In this study, the effects of the approaches defined in different design regulations for effective cross-section stiffness used in earthquake resistant structural design on structural behavior were investigated comparatively. For this purpose, investigation of the reliability of the above-mentioned values used in the Turkish Building Seismic Code (TBSC-2018) is aimed at considering current experimental, numerical, and analytical studies. Several sample finite elements models created for evaluation are analyzed with nonlinear time-history analysis including different effective stiffnesses. In the study, 3 dimensional reinforced concrete models with 8 stories, having no irregularity, and satisfying current design specifications are evaluated under 11 different strong ground motions. Average values obtained from numerical analysis results are compared with each other in TBSC-2018, Federation Internationale du Beton (FIB) Model Code 2010, and some current widely accepted international studies. Within this scope, dynamic characteristics of the structure with changing force, displacement, and relative story drift due to effective cross-section stiffness are evaluated. According to the obtained results, it is proposed that the effective sectional stiffness definitions used for structural performance evaluation defined in TBSC-2018 should be modified.

*İlgili Yazar, email: hakanozturk@sakarya.edu.tr

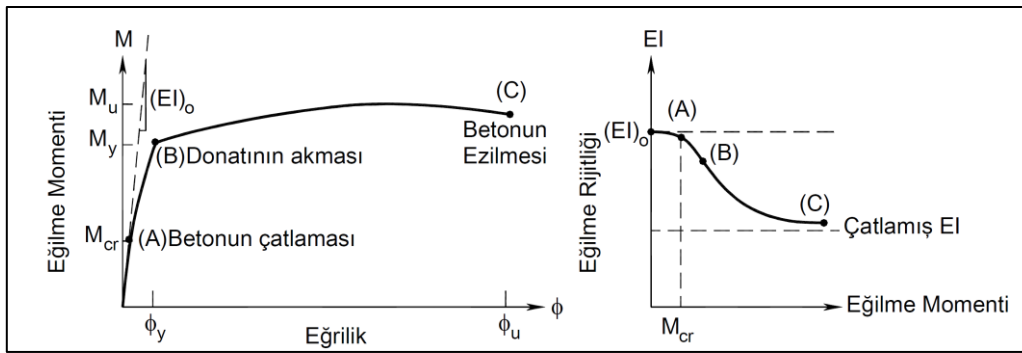
1. Giriş

Ülkemiz birçok aktif fay zonuna sahip olması sebebiyle depreme dayanıklı yapı tasarımı kavramı büyük bir önem arz etmektedir. Yapı davranışının iyi bilinmesi ve günümüzde hesaplamalar için kullanılan bilgisayar programları ile bu davranışın gerçeğe en yakın şekilde modellenmesi, yapı mühendislerinin daha hassas sonuçlar elde etmesine olanak sağlamaktadır. Günümüzde bilinen gerçek yapı davranışının doğrusal olmaması ve deprem sonrasında yapılarda meydana gelecek hasar seviyelerini belirleyebilmek amacıyla performans dayalı tasarım kavramı ortaya çıkmıştır. Performansa dayalı tasarım yaklaşımında taşıyıcı sistemin malzeme davranışı en önemli etkenlerden biridir. Yapı mühendisliğinde kullanılan malzemelerin doğrusal olmadığı ve kompleks bir davranış sergilediği bilinmektedir [1]. Bu kompleks davranışı yakınsamak adına birtakım basitleştirilmiş malzeme modelleri geliştirilmiştir [1]. Betonarme elemanlar özelinde yapılan bu çalışmalarda sargı donatısının beton dayanımına ve süneklığe büyük oranda katkı sağladığı tespit edilmiştir [2]. Bu çalışmada da sargısız ve sargılı beton malzemesi için Mander [3] malzeme modeli kullanılmıştır.

Etkin kesit rijitliği kavramı, elemanların eğilme rijitliğini temsil eden bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Betonarme elemanlarda eğilme rijitliğinin göstergesi olarak eğilme momenti - eğrilik ilişkileri göz önüne alınmaktadır. Elemanların moment - eğrilik ilişkilerini analitik olarak incelemek ve parametrik çalışmalar gerçekleştirmek adına bilgisayar yazılımları geliştirilmiştir [4]. Betonarme kesitlerin eğilme momenti - eğrilik ilişkisini incelemek üzere yapılan çalışmalarda eksenel kuvvet, enine ve boyuna donatı oranları, beton dayanımı parametrelerinin eğrilik sünekliliği ve etkin kesit rijitliği gibi özelliklere etkisi irdelenmiştir [4] [5]. Kumbasar [6] tarafından betonarme kesitlerin eğilme rijitliği üzerine yapılan çalışmada; boyuna donatı oranı, dış merkezlik oranı ve eksenel yük gibi parametreler göz önüne alınarak etkin kesit rijitliği için birtakım bağıntılar önerilmiştir.

Betonarme elemanlarda etkin kesit rijitlikleri farklı yönetmeliklerde farklı şekillerde ele alınmaktadır. Tekinsav vd. [7] tarafından yapılan çalışmada, bir kiriş kesitinin boyutları sabit tutulup beton dayanımı, enine ve boyuna donatı oranları parametreleri değiştirilerek analitik yöntemlerle etkin kesit rijitliği değerleri hesaplanmış ve bu değerler DBYBHY [8], TBDY [9] ve Eurocode-8 [10] yönetmeliklerinde sunulan etkin kesit rijitliği değerleri ile kıyaslanmıştır. Bir başka çalışmada, farklı tasarım yönetmeliklerindeki etkin kesit rijitliği değerleri göz önüne alınarak betonarme bir yapının doğrusal olmayan yöntemler ile elemanların performans seviyesi belirlenmiş ve etkin kesit rijitliklerinin değişimi ile elemanlarda farklı düzeyde hasar seviyeleri tespit edilmiştir [11]. Etkin kesit rijitliklerinin incelenmesinde yapay sinir ağları ve genetik programlama gibi yöntemlere dayalı tahmin modelleri ve formülasyonlar da geliştirilmiştir [12] [13].

Şekil 1'de betonarme bir kesitin Eğilme momenti - Eğrilik ve Eğilme momenti - Eğilme rijitliği ilişkilerinin genel bir gösterimi verilmiştir. Grafikler incelendiğinde donatının akması (B) durumundan sonra eğilme rijitliğinde ciddi bir azalma olduğu görülmektedir. Çatlamış eğilme rijitliği olarak adlandırılan bu parametrenin, yukarıda bahsedilen ve bu çalışmada yer alan bulgulara göre, yapı tasarımı ve deprem performans seviyesinin belirlenmesi gibi mühendislik konularında önemli bir yere sahip olduğu kaçınılmaz bir olgudur.



Şekil 1. Eğilme Momenti - Eğilme Rijitliği ilişkisi

Bu çalışmada betonarme çerçeve taşıyıcı sisteme sahip 8 katlı yapının ETABS [14] sonlu elemanlar programı yardımıyla 11 çift deprem kaydı kullanılarak zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiştir. Betonarme kesitlerde farklı şekillerde ele alınan etkin kesit rijitliği katsayısının bina davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu farklılıklar neticesinde yapıda meydana gelen kuvvet, yer değiştirme ve görelî kat ötelemesi talepleri ile yapıya ait dinamik karakteristikler değerlendirilmiştir. Nümerik analizlerden elde edilen sonuçların ortalaması alınarak analiz sonuçları Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) [9], Federation Internationale du Beton (FIB) Model Code 2010 [17] ve bu alanda uluslararası kabul görmüş güncel çalışmalar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada doğrusal olmayan analiz yöntemlerinden biri olan Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz yöntemi kullanılmıştır. Zaman tanım alanında analizlerde kullanılan deprem kayıtlarını elde etmek için üç kaynak mevcuttur. Bunlardan; gerçek deprem kayıtları, benzeştirilmiş kayıtlar ve yapay olarak oluşturulmuş kayıtlar olarak söz edilebilir [15]. Çalışmada 11 çift gerçek deprem yer hareketi kullanılmış ve kayıtlara ait veriler Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi (PEER) [16] kuvvetli yer hareketi veri tabanından elde edilmiştir. Gerçek deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesi için zaman ve frekans tanım alanında olmak üzere iki yöntem bulunmaktadır [15]. Bu çalışmada deprem kayıtlarının frekans içeriğini değiştirmemek adına zaman tanım alanında ölçekleme yöntemi kullanılarak her bir model için ölçekleme katsayıları belirlenmiştir.

Betonarme kesitlerin etkin kesit rijitlikleri Başlangıç, TBDY 2018 [9] Tasarım, TBDY 2018 [9] Performans, FIB 2010 [17], Grammatikou vd. [18] olmak üzere beş farklı model için hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda kullanılan bağıntılar Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1. Etkin kesit rijitliği bağıntıları

Model	$\theta_{shear,y}$	θ_y	EI_{eff}
Başlangıç	-	-	E_0
TBDY 2018 [9] Tasarım	-	-	Kolonlarda $0.70E_0$ Kirişlerde $0.35E_0$
TBDY 2018 [9] Performans	-	$\theta_y = \frac{\varphi_y L_s}{3} + 0.0015\eta \left(1 + 1.5 \frac{h}{L_s}\right) + \frac{\varphi_y d_b f_{ye}}{8\sqrt{f_{ce}}}$	$EI_{eff} = \frac{M_y L_s}{3\theta_y}$
FIB 2010 [17]	-	$\theta_y = \frac{\varphi_y L_s}{3}$	$EI_{eff} = \frac{M_y L_s}{3\theta_y}$
Grammatikou vd. [18]	$\theta_{shear,y} = 0.0019 \left(1 + \frac{h}{1.6L_s}\right)$	$\theta_y = \frac{L_s + \alpha_v z}{3} + \alpha_{sl} \frac{\varphi_y d_b f_{ye}}{8\sqrt{f'_c}} + \theta_{shear,y}$	$EI_{eff} = \frac{M_y L_s}{3\theta_y}$

TBDY 2018’de dayanıma göre tasarlanan (DGT) bir yapıda da değerlendirmeye alındığında mevcut yapı olarak değerlendirilip şekil değiştirmeye göre (ŞGDT) analiz edilerek sonuçları yorumlanır. Dolayısıyla mevcut tasarım yaklaşımının değerlendirme ile arasında oluşabilecek muhtemel farklılıkları karşılaştırmak adına DGT’de (Tasarım) tanımlanan etkin kesit eğilme rijitlikleri çalışmaya dâhil edilmiştir.

2.1. Yapı bilgisi

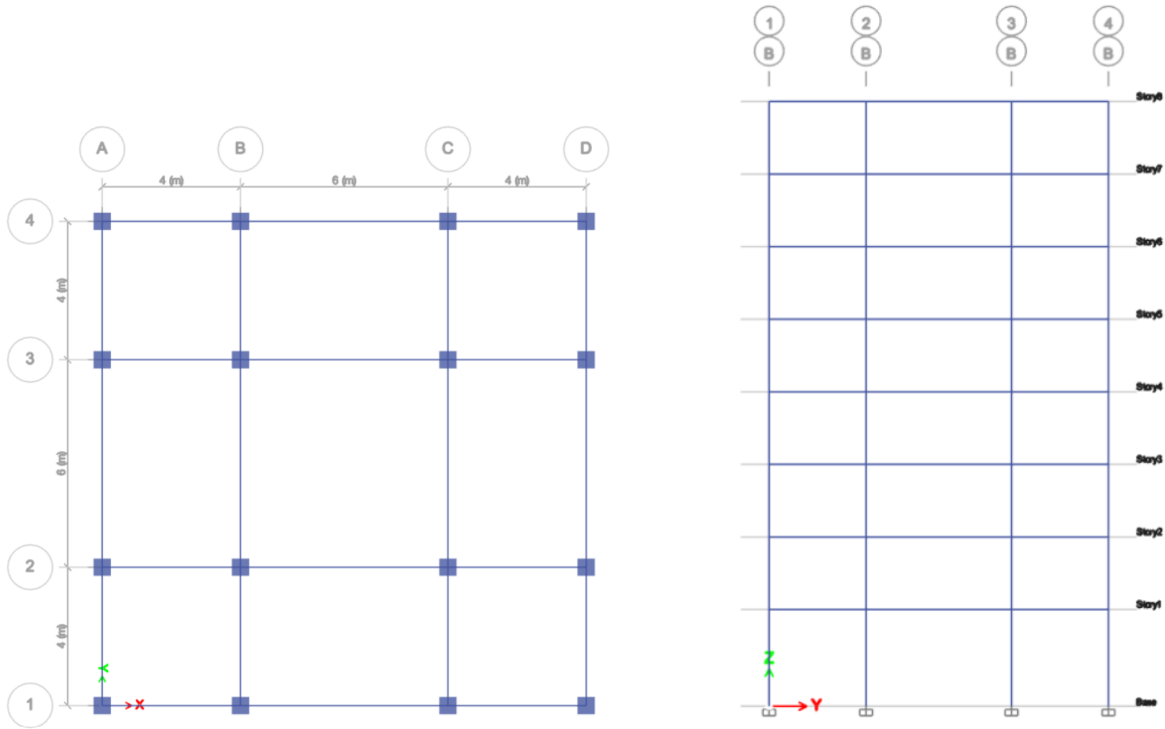
Bu çalışmada ele alınan yapının malzemesi betonarme olup çerçeve taşıyıcı sisteme sahiptir. X ve Y yönlerinde eşdeğer olan yapı aynı zamanda iki doğrultuda da simetrik özelliklerdedir. Beton sınıfı C25 ve donatı sınıfı S420 olarak belirlenmiştir. Yapı tüm katlarda aynı plana sahip olup 1. kat, 2-3-4. katlar, 5-6-7-8. katlar olmak üzere kolonlar için farklı etkin kesit rijitlikleri kullanılmıştır. Kirişlerde açıklık uzunluğuna göre etkin kesit rijitlikleri değişmektedir. Bu bağlamda iki farklı kiriş tipi elde edilmiştir. Yapıdaki elemanlara ait bilgiler Tablo 2’de detaylı şekilde verilmiştir [9].

Tablo 2. Elemanlara ait bilgiler

Kesit adı	Eleman	Beton-Donatı sınıfı	Betonun Elastisite Modülü (MPa)	Donatının Elastisite Modülü (MPa)	Donatının Akma Dayanımı (MPa)	Boyutlar (mm)	Boyuna ve Enine Donatılar (mm)
C1	Kolon	C25 – S420	30000	210000	420	500x500	12Φ18 Φ10/100
B1	Kiriş	C25 – S420	30000	210000	420	300x600	6Φ12 Φ10/100

Çalışmada kullanılan yapısal model için gerçek bir yapı kullanılmamıştır. Yapının Sakarya’da TBDY 2018’e göre tasarımı yapılarak inşa edileceği varsayılmıştır. Yapı konum olarak deprem riski yüksek olduğu düşünülen Sakarya ilindedir ve zemin sınıfı ZD olarak seçilmiştir. Yapı X ve Y yönlerinde 14’er metre uzunluğa sahiptir ve üçer açıklıktan oluşmaktadır. Yapının zemin katı 4 metre yüksekliğe sahip olmakla birlikte diğer katlar ise 3 metre

yükseklindedir, yapının toplam yüksekliği 25 metredir. Şekil 2’de yapıya ait kat planı ve B aksına ait görünüş verilmiştir.



Şekil 2. ETABS kat planı ve B aksının görünüşü

2.2. Kullanılan deprem kayıtları

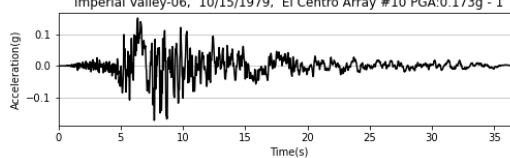
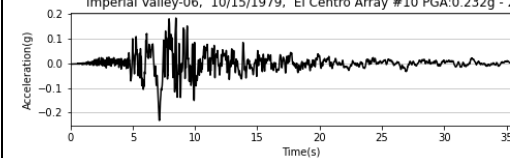
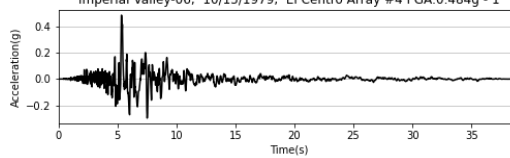
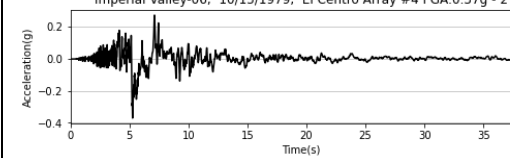
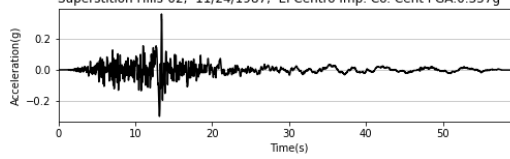
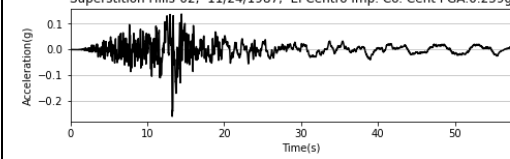
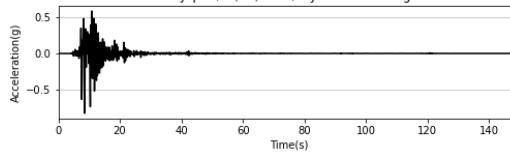
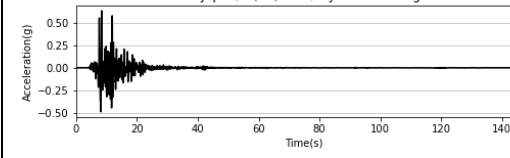
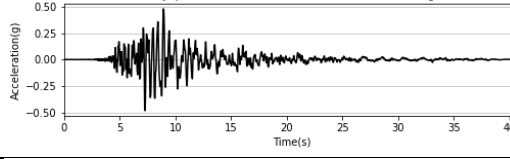
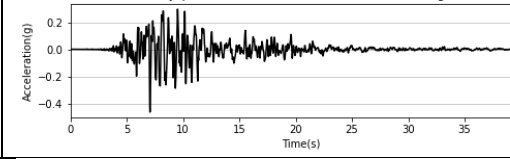
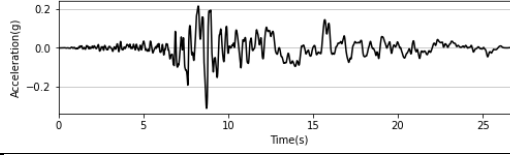
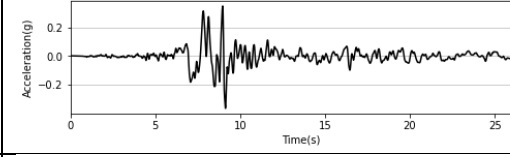
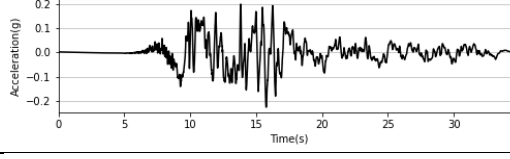
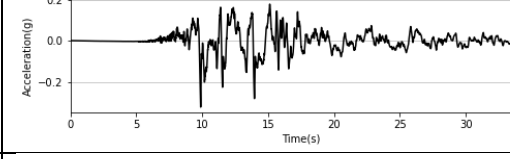
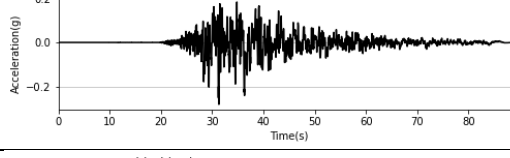
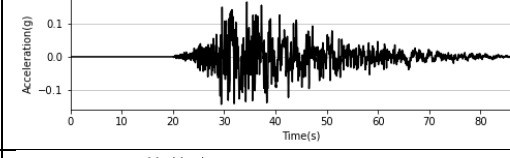
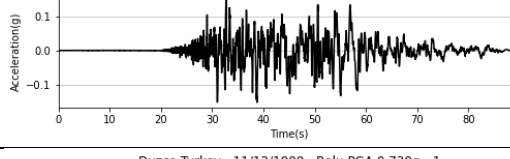
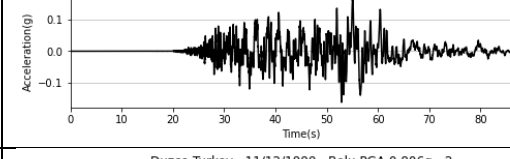
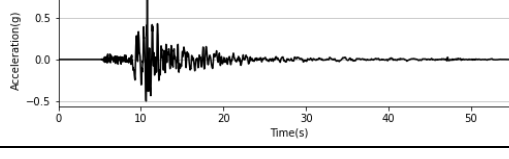
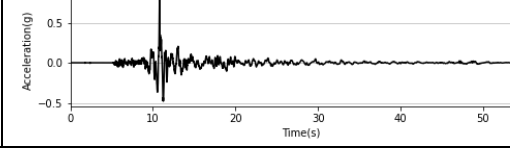
Bu çalışmada PEER yer hareketi veri tabanından elde edilmiş 11 adet deprem hareketi kullanılmıştır. Bu deprem kayıtları iki bileşenden oluşmak üzere toplamda 22 ivme kaydı analizlerde kullanılmıştır. Yapıların X ve Y yönlerinin eşdeğer olması sebebiyle X ve Y yönlerinde deprem kayıtları eş zamanlı olarak uygulanarak her bir model yapı için 11 adet zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz gerçekleştirilmiştir. 5 farklı etkin kesit rijitliği yaklaşımı için toplamda 55 adet zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kullanılan deprem kayıtlarının maksimum yer ivmesi (peak ground acceleration), RSN (Record Sequence Number) ve hareket süresi bilgileri Tablo 3’te sunulmuştur.

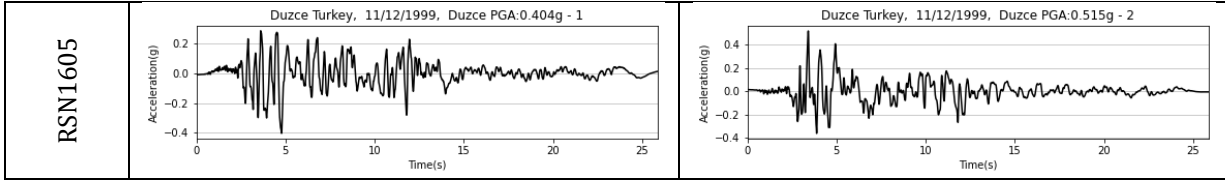
Tablo 3. Kullanılan deprem kayıtlarının bilgileri

Deprem	Yıl	İstasyon	PGA (g)	Süre (s)
El Centro, ABD	1979	RSN173 - El Centro #10	0,232g	37,05
		RSN179 - El Centro #4	0,484g	39,085
Superstition Hills, ABD	1987	RSN721 - El Centro Imp. Co. Cent	0,357g	59,99
Kobe, Japonya	1995	RSN1106 - KJMA	0,834g	149,98
		RSN1111 - Nishi-Akashi	0,483g	40,95
Kocaeli, Türkiye	1999	RSN1158 - Duzce	0,364g	27,18
		RSN1176 - Yarimca	0,322g	34,995
Chi-Chi, Tayvan	1999	RSN1193 - CHY024	0,282g	89,995
		RSN1535 - TCU109	0,162g	89,995
Duzce, Türkiye	1999	RSN1602 - Bolu	0,806g	55,89
		RSN1605 - Duzce	0,515g	25,88

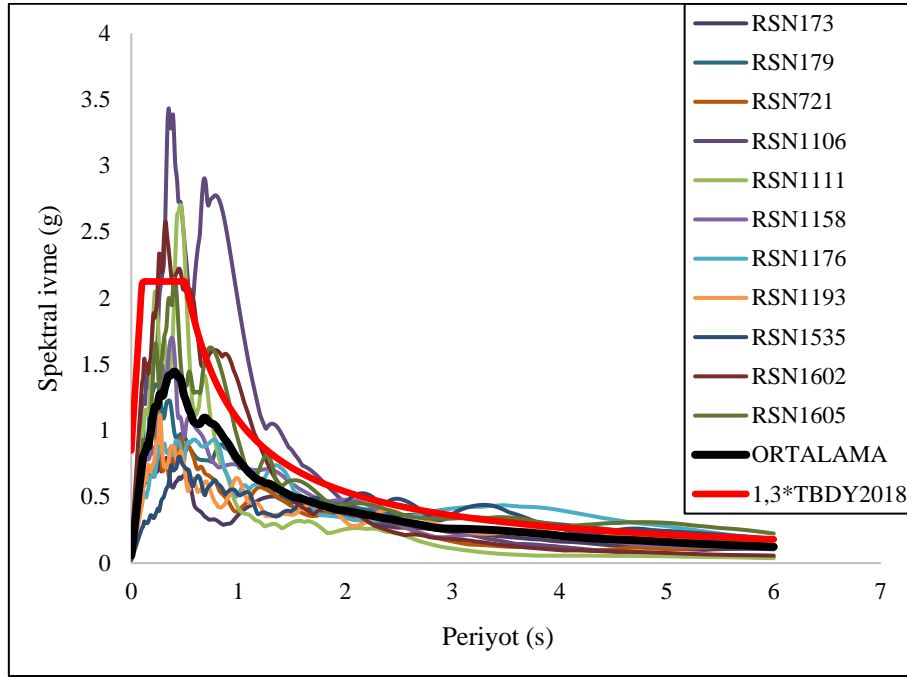
Çalışmada kullanılan ve Tablo 3’te verilen deprem kayıtlarına ait ivme – zaman grafikleri ile pik ivme değerleri ile Tablo 4’te verilmiştir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 ve AFAD tarafından sunulan Türkiye Deprem Tehlike Haritaları kullanımıyla Deprem Yer Hareketi Düzeyi – 2 (DD-2) seviyesine göre yatay elastik ivme tasarım spektrumu elde edilmiştir [19]. Tablo 4’te verilen ivme kayıtlarının her bir bileşeni için davranış spektrumları elde edilmiştir. Her bir deprem hareketinin iki bileşenine ait davranış spektrumları, kareleri toplamının karekökü yöntemi ile bileşke spektruma dönüştürülmüş ve 11 deprem yer hareketi için Şekil 3’te görüldüğü gibi ortalama davranış spektrumu elde edilmiştir.

Tablo 4. Kullanılan deprem kayıtları

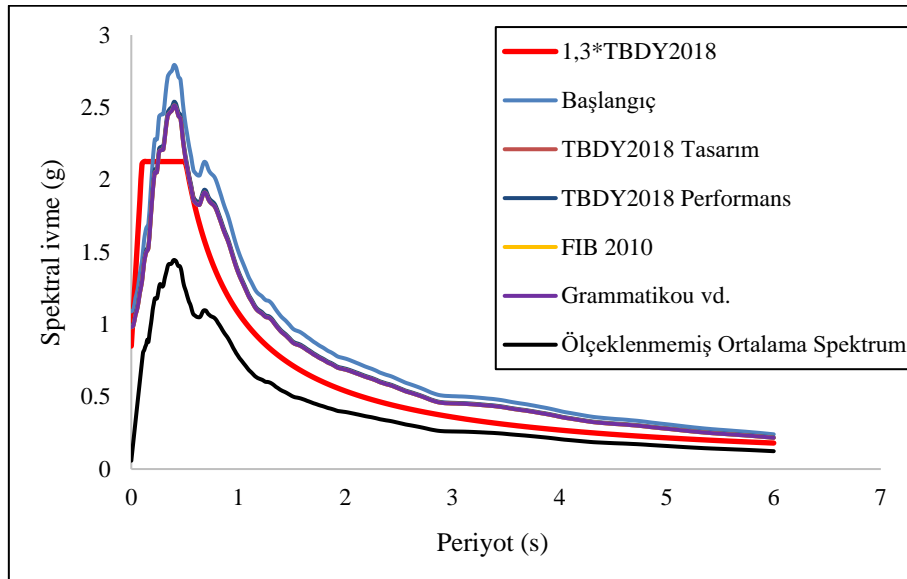
İstasyon	Deprem bileşeni - 1	Deprem bileşeni - 2
RSN173	Imperial Valley-06, 10/15/1979, El Centro Array #10 PGA:0.173g - 1 	Imperial Valley-06, 10/15/1979, El Centro Array #10 PGA:0.232g - 2 
RSN179	Imperial Valley-06, 10/15/1979, El Centro Array #4 PGA:0.484g - 1 	Imperial Valley-06, 10/15/1979, El Centro Array #4 PGA:0.37g - 2 
RSN721	Superstition Hills-02, 11/24/1987, El Centro Imp. Co. Cent PGA:0.357g - 1 	Superstition Hills-02, 11/24/1987, El Centro Imp. Co. Cent PGA:0.259g - 2 
RSN1106	Kobe Japan, 1/16/1995, KJMA PGA:0.834g - 1 	Kobe Japan, 1/16/1995, KJMA PGA:0.63g - 2 
RSN1111	Kobe Japan, 1/16/1995, Nishi-Akashi PGA:0.483g - 1 	Kobe Japan, 1/16/1995, Nishi-Akashi PGA:0.464g - 2 
RSN1158	Kocaeli Turkey, 8/17/1999, Duzce PGA:0.312g - 1 	Kocaeli Turkey, 8/17/1999, Duzce PGA:0.364g - 2 
RSN1176	Kocaeli Turkey, 8/17/1999, Yarimca PGA:0.227g - 1 	Kocaeli Turkey, 8/17/1999, Yarimca PGA:0.322g - 2 
RSN1193	Chi-Chi Taiwan, 9/20/1999, CHY024 PGA:0.282g - 1 	Chi-Chi Taiwan, 9/20/1999, CHY024 PGA:0.165g - 2 
RSN1535	Chi-Chi Taiwan, 9/20/1999, TCU109 PGA:0.151g - 1 	Chi-Chi Taiwan, 9/20/1999, TCU109 PGA:0.162g - 2 
RSN1602	Duzce Turkey, 11/12/1999, Bolu PGA:0.739g - 1 	Duzce Turkey, 11/12/1999, Bolu PGA:0.806g - 2 



Deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesi için basit ölçeklendirme yönteminden faydalanılarak tasarım spektrumunun 1,3 katı hedef spektrum olarak belirlenmiştir. TBDY 2018'de belirtildiği üzere bina hakim periyodunun (T_p) 0,2 ve 1,5 katları periyot aralığında deprem kayıtlarından alınan spektral ivme değerlerinin gözü önüne alınan hedef spektrumdaki (TBDY 2018'e göre tanımlanan tasarım ivme spektrumu) deprem yer hareketlerinin genliklere göre ölçeklendirilecektir. Ölçeklenmiş bileşke spektrumların ortalamasından elde edilen $0.2T_p$ ve $1.5T_p$ periyotları arasındaki spektral ivme değerlerinin, TBDY 2018'e göre tanımlanan tasarım ivme spektrumundaki genliklerden küçük olmaması koşuluna uygun biçimde Şekil 4'te görüldüğü gibi deprem kayıtları ölçeklendirilmiştir.



Şekil 3. Deprem hareketlerine ait davranış spektrumları ve ortalama spektrum grafikleri



Şekil 4. Ölçeklenmiş spektrum grafikleri

2.3. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz

Doğrusal olmayan analizlerde ilk aşama olarak doğrusal olmayan malzeme tanımlaması yapılmalıdır. Bu çalışmada TBDY’de yer alan doğrusal olmayan malzeme modelleri kullanılmıştır. Eleman kesitlerinin analizleri için XTRACT [20] kesit analiz programından yararlanılmıştır. XTRACT programında kesitlerin moment-eğrilik ilişkileri belirlenmiştir. Yapının taşıyıcı sistemi çerçevelerden oluştuğu için doğrusal olmayan davranış modeli olarak Yığılı Plastik Davranış (Plastik Mafsallı) Modeli tercih edilmiştir. Kolon elemanlar için P-M2-M3, kiriş elemanlar için ise M3 plastik mafsalları tanımlanmıştır.

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler için yapının kendi ağırlığı (sabit ve hareketli yükler) basamak fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Ölçeklendirilmiş deprem kayıtları bu basamak fonksiyonundan sonra etkiyecek şekilde yapıya etkilmiştir. Deprem kayıtları her iki bileşen aynı anda olacak şekilde X ve Y yönlerinde etkilmiştir. Yapı her iki doğrultuda eşdeğer olduğu için bileşenler arasında 90° dönüşüm yapılmasına gerek görülmemiştir. Toplamda 5x11 olmak üzere 55 adet zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz gerçekleştirilmiştir.

3. Bulgular

Bu çalışmada etkin kesit rijitliği parametresinin yapı davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Etkin kesit rijitliği katsayısının farklı şekilde ele alınmasında dinamik parametreler ile birlikte taban kesme kuvveti, tepe deplasmanı ve görel kat ötelemesi gibi yapı davranışını önemli ölçüde temsil eden sonuçlar incelenmiştir.

XTRACT programından elde edilen moment-eğrilik ilişkileri sonucunda incelenen 5 farklı yaklaşım için etkin kesit rijitlikleri Tablo 1’de verilen bağıntılar kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan etkin kesit rijitliği katsayıları Tablo 5’te görülmektedir. Başlangıç modelinde hiçbir azaltma yapılmayıp eleman rijitlikleri başlangıç değerleri olarak kabul edilmiştir. En düşük etkin kesit rijitliği katsayıları ise TBDY 2018 [9] Performans ve Grammatikou vd. [18] yaklaşımlarında görülmektedir.

Tablo 5. Hesaplanan etkin kesit rijitliği katsayıları

Eleman	Başlangıç	TBDY2018 Tasarım	TBDY2018 Performans	FIB 2010	Grammatikou vd.
Kolon 5-8. katlar	1	0.7	0.148	0.298	0.147
Kolon 2-4. katlar	1	0.7	0.174	0.337	0.173
Kolon zemin kat	1	0.7	0.202	0.337	0.199
Kiriş (4m)	1	0.35	0.090	0.177	0.089
Kiriş (6m)	1	0.35	0.112	0.177	0.109

Tablo 5’te verilen etkin kesit rijitliği katsayıları göz önüne alınarak yapılan analizler sonucunda 11 adet deprem yüklemesi durumu için ortalama değerler hesaplanmıştır. Yapılara ait periyot değerleri ve analizler sonucunda elde edilen ortalama taban kesme kuvveti ve ortalama tepe deplasman değerleri Tablo 6 ve Tablo 7’de görülmektedir.

Tablo 6. Periyot, taban kesme kuvveti ve tepe deplasmanı sonuçları (X yönü)

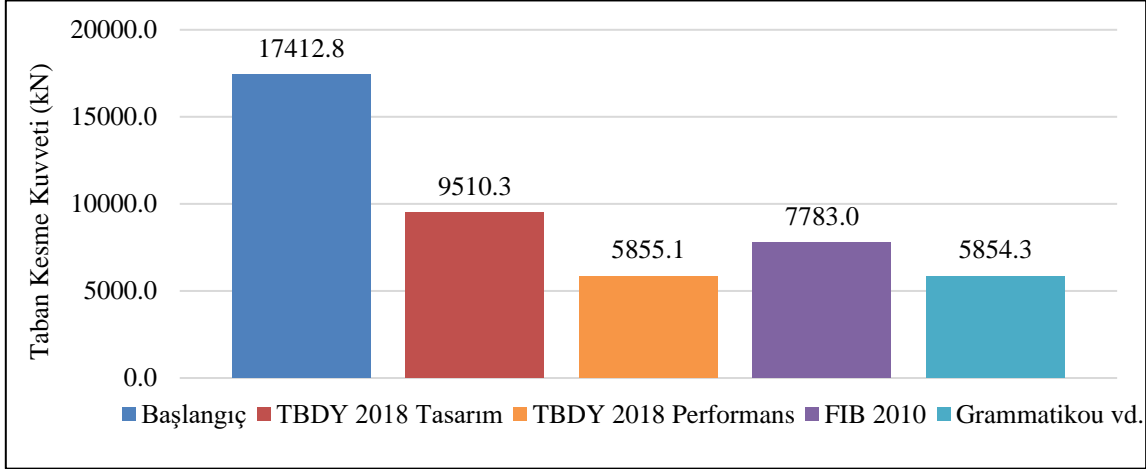
Model	Periyot T (s)	Ortalama taban kesme kuvveti (kN)	Ortalama tepe deplasmanı (m)
Başlangıç	0,861	17412,76	0,299
TBDY 2018 Tasarım	1,226	9510,25	0,315
TBDY 2018 Performans	2,311	5855,08	0,685
FIB 2010	1,715	7783,01	0,472
Grammatikou vd.	2,325	5854,28	0,694

Tablo 7. Periyot, taban kesme kuvveti ve tepe deplasmanı sonuçları (Y yönü)

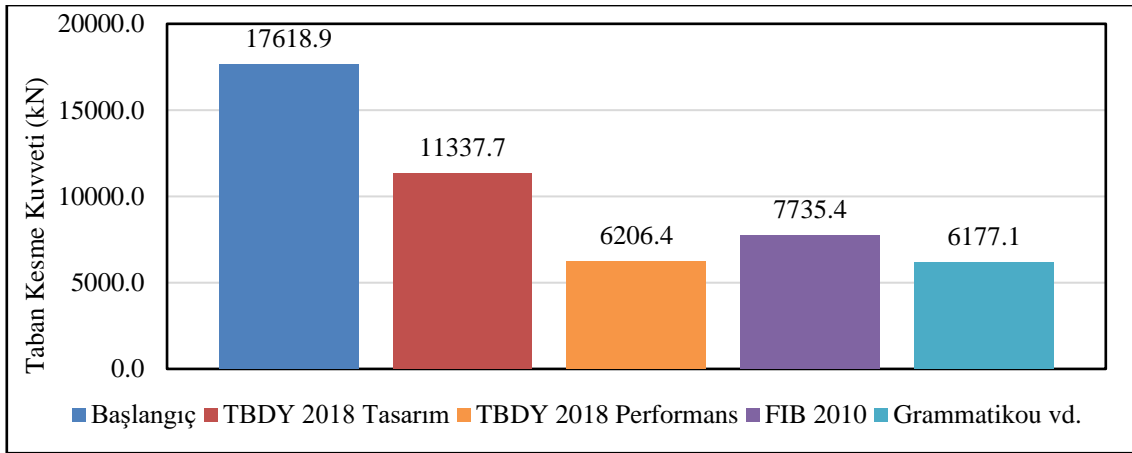
Model	Periyot T (s)	Ortalama taban kesme kuvveti (kN)	Ortalama tepe deplasmanı (m)
Başlangıç	0,861	17618,91	0,302
TBDY 2018 Tasarım	1,226	11337,74	0,380
TBDY 2018 Performans	2,311	6206,44	0,745
FIB 2010	1,715	7735,42	0,528
Grammatikou vd.	2,325	6177,07	0,748

Tablo 6 ve Tablo 7’de verilen sonuçlar incelendiğinde maksimum taban kesme kuvveti Başlangıç modelinde maksimum tepe deplasmanı ise Grammatikou vd. modelinde oluşmuştur. TBDY 2018 Performans modeli ise Grammatikou vd. modeline oldukça yakın sonuçlar vermiştir.

Şekil 5 ve Şekil 6’da ortalama taban kesme kuvvetlerinin sütun grafik olarak gösterimi verilmiştir. Bu grafikler ile Tablo 6 ve Tablo 7’nin anlaşılması hedeflenmiştir.

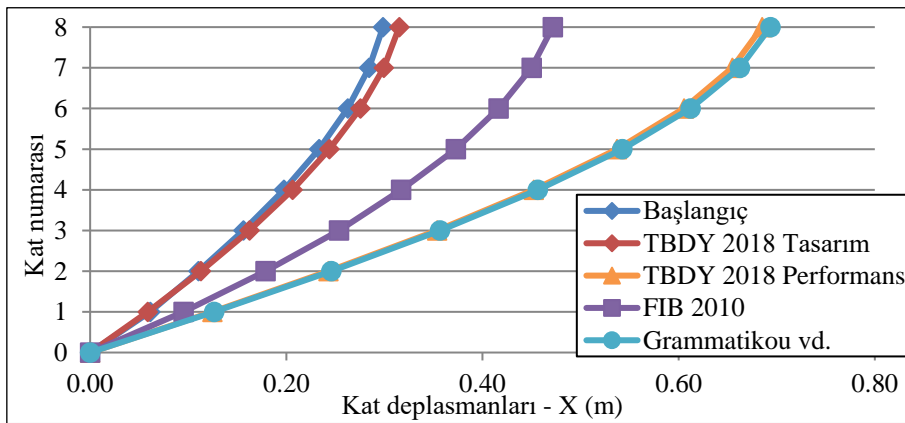


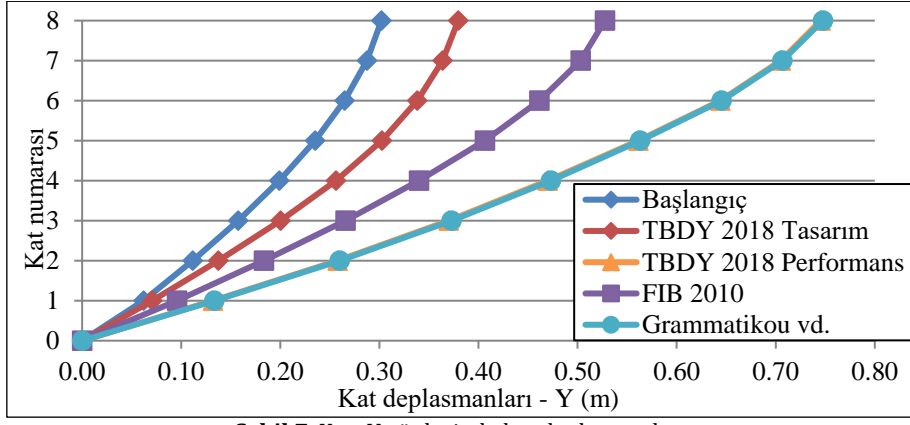
Şekil 5. X yönü için ortalama taban kesme kuvveti değerleri



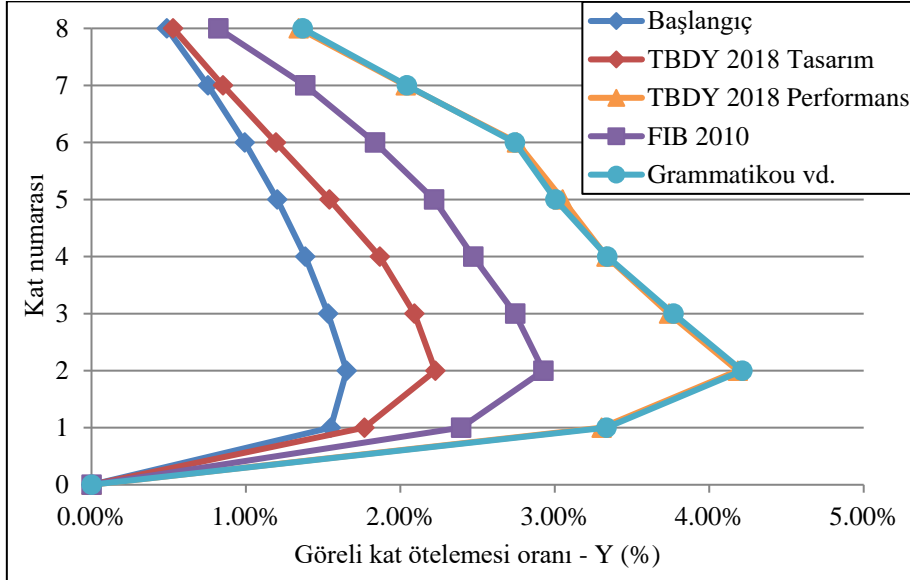
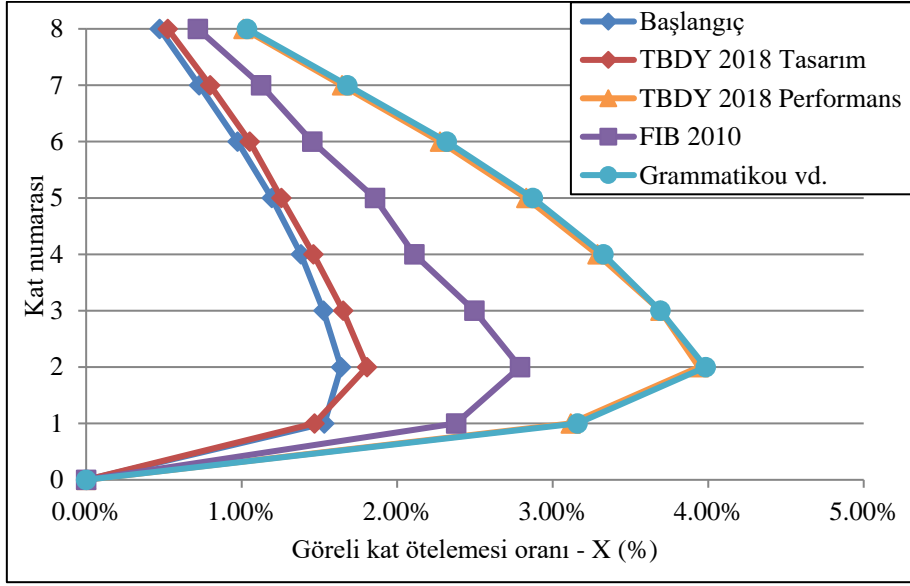
Şekil 6. Y yönü için ortalama taban kesme kuvveti değerleri

Yapı davranışının en önemli parametreleri içerisinde kat yerdeştirmeleri ve görel kat ötelemesi değerleri yer almaktadır. Şekil 7 ve Şekil 8’de analizler sonucunda elde edilen kat yerdeştirmeleri ve görel kat ötelemesi oranları görölmektedir.





Şekil 7. X ve Y yönlerinde kat deplasmanları



Şekil 8. X ve Y yönlerinde görece kat ötelemesi oranları

Şekil 7 ve Şekil 8 incelendiğinde maksimum deplasman ve görece kat ötelemeleri TBDY 2018 Performans ve Grammatikou vd. modelinde elde edilmiştir. Beklenildiği üzere hiçbir kesit rijitliği azaltılmayan Başlangıç modeli en rijit davranışı sergileyerek deprem etkisi altında en düşük deplasmanı yapacak davranışı sergilemiştir.

4. Tartışma ve Sonuç

8 katlı betonarme taşıyıcı sisteme sahip, konum olarak Sakarya ilinde bulunan yapı modelleri zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemi ile 11 deprem hareketi etkisinde incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda farklı etkin kesit rijitliği kullanımının yapı davranışını önemli derecede etkilediği görülmüştür. Bu farklılıkların gerçek yapı davranışını ne derecede yansıttığı konusunda belirsizlik oluşmaktadır. Ayrıca, bu çalışmada Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nin tasarım ve performans yaklaşımlarında kullanılan farklı etkin kesit eğilme rijitliklerinin dikkate alınması durumunda analiz sonuçlarına göre yapı davranışı bakımından önemli farkların oluşabileceği gözlemlenmiştir. Böylelikle tasarımı TBDY 2018'deki DGT ile yapılan birçok yapının mevcut yapı olarak ŞGDT'ye göre performans değerlendirmesi yapıldığında, öngörülenden daha büyük yerdeğiştirmelere maruz kalabileceği, yapıda oluşan iç kuvvet dağılımını değiştirebileceği ve görelî kat ötelemesi sınırlarının aşılabileceği düşünülmektedir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği Performans yapı modeli göz önüne alındığında diğer yaklaşımlara göre daha olumsuz sonuçların elde edildiği görülmüştür. Yapıların maliyet ve işçiliği göz önüne alınırsa bu durum ilave kaynak kullanımına sebep olmaktadır. Yapılan bu çalışmada incelenen modellerin simetrik yapıda oldukları ve düzensizlik bakımından bir kusuru bulunmadığından dolayı daha kapsamlı sonuçlar elde etmek için çalışma alanının genişletilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre yapısal performans değerlendirmesinde kullanılan ve TBDY 2018'de belirlenen etkin kesit rijitliğine ait tanımlamaların güncellenmesi önerilmektedir.

Kaynakça

- [1] Celep, Zekai. 2017. Betonarme taşıyıcı sistemlerde doğrusal olmayan davranış ve çözümleme. Dördüncü Baskı. Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., İstanbul, 234s.
- [2] Binici, B. 2005. An analytical model for stress-strain behavior of confined concrete. *Engineering Structures*, 27(7), 1040-1051.
- [3] Mander, J. B., Priestley, M. J., & Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of structural engineering*, 114(8), 1804-1826.
- [4] Ersoy, U., & Özcebe, G. 1998. Sarılmış betonarme kesitlerde moment-eğrilik ilişkisi analitik bir irdeleme. *İMO Teknik Dergi*, 9(4), 1799-1827.
- [5] Akkaya, A. 2014. Betonarme kolon davranışının moment eğrilik ilişkisi ile parametrik olarak incelenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 82s, Sakarya.
- [6] KUMBASAR, N. 2015. Betonarme Kesitlerin Eğilme Rijitliği. *İMO Teknik Dergi*, 26(4), 7265-7278.
- [7] Tekinsav, E., Çanak, P., Dok, G., Öztürk, H. 2018. Betonarme Kirişlerin Etkin Eğilme Rijitliği Analizi ve Yönetmeliklerle Karşılaştırması. 2ND International Symposium on Natural Hazards and Disaster Management, 04-06 Mayıs, Sakarya, 765-775.
- [8] Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik. 2007. T. C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi, Ankara.
- [9] Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. 2018. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- [10] British Standards Institution. 1996. Eurocode 8 : design provisions for earthquake resistance of structures. British Standards Institution.
- [11] Dok, G., Ozturk, H., Demir, A., Çağlar, N. 2020. Investigation of Effective Bending Rigidity Considering Different Code Approaches. *Academic Platform Journal of Natural Hazards and Disaster Management*, 1(1), 35-48.
- [12] Das, S., & Choudhury, S. 2019. Influence of effective stiffness on the performance of RC frame buildings designed using displacement-based method and evaluation of column effective stiffness using ANN. *Engineering Structures*, 197, 109354.
- [13] Çağlar, N., Demir, A., Ozturk, H., & Akkaya, A. 2015. A simple formulation for effective flexural stiffness of circular reinforced concrete columns. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 38, 79-87.
- [14] ETABS v.18.1.1 Extended Three Dimensional Analysis of Building System, Computers and Structures Inc., Berkeley, California.

- [15] Özdemir, Z., & Fahjan, Y. M. 2007. Gerçek deprem kayıtlarının tasarım spektrumlarına uygun olarak zaman ve frekans tanım alanlarında ölçekleme yöntemlerinin karşılaştırılması. Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 16-20 Ekim, İstanbul, 435-446.
- [16] Pacific Earthquake Engineering Research Center. 2005. PEER Strong Motion Database on Line. Berkley. <https://peer.berkeley.edu/peer-strong-ground-motion-databases>.
- [17] Federation Internationale du Beton (FIB). 2010. fib Model Code for Concrete Structures 2010. 10.1002/9783433604090.
- [18] Grammatikou, S., Biskinis, D., & Fardis, M. N. 2018. Effect of load cycling, FRP jackets, and lap-splicing of longitudinal bars on the effective stiffness and ultimate deformation of flexure-controlled RC members. Journal of Structural Engineering, 144(6), 04018056.
- [19] AFAD, 2018. Türkiye Deprem Tehlike Haritası, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, <http://tdth.afad.gov.tr/TDTH>
- [20] XTRACT v.3.0. Cross-sectional X structural analysis of components, Imbsen Software Systems, 9912 Business Park Drive, Suite 130 Sacramento, CA 95827.

A Multi-Dimensional Hydrogeochemical Assessment and Water Quality Analysis of Groundwater Resources in Yozgat Province

Busra Gulsah Gunes¹, Nuray ATES² 

¹Graduate School of Natural and Applied Sciences, Erciyes University, Kayseri, Türkiye

²Dept. of Environmental Engineering, Erciyes University, Türkiye

*Corresponding Author: nuraya@erciyes.edu.tr

(Alınış / Received: 15.03.2024, Kabul / Accepted: 29.04.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.08.2024)

Keywords

Groundwater,
Hydrogeochemistry,
Water quality, Yozgat
Province, Piper Diagram,
Multivariate analysis.

Abstract: In this study, it was aimed to evaluate the hydrogeochemical properties and water quality for drinking, agricultural irrigation and other purposes of ground water resources within the boundaries of Yozgat Province. Within the scope of the study, the analysis results of water samples taken from 79 wells in 12 districts within the provincial borders between 2016 and 2019 were examined. Hydrogeochemical evaluation of water samples was performed according to Piper diagram, Spearman correlation, Gibbs diagram, Cluster analysis and Factor analysis. Water quality was evaluated according to standards and regulations regarding drinking water, utility and agricultural irrigation. According to the results of Spearman correlation analysis, the highest relationships were observed between electrical conductivity (EC), sulfate (SO₄) and total dissolved solids (TDS). There are two different types of groundwater in the region: water with Ca-Mg-Cl and water with Ca-Mg-HCO₃, and it has been concluded that the rock dominant mechanism is effective on the quality of water resources. Cluster analysis showed that regions close to each other have similar water characteristics due to similar geological structure. In factor analysis, Factor 1 constitutes 41% of the total variance. Additionally, it has been determined that the water resources in the region are suitable for drinking use and agricultural irrigation.

Yozgat İli Yeraltı Suyu Kaynaklarının Çok Boyutlu Hidrojeokimyasal Değerlendirmesi ve Su Kalitesi Analizi

Anahtar Kelimeler

Yeraltı suyu,
Hidrojeokimya,
Su kalitesi, Yozgat İli, Piper
Diyagramı, Çok Değişkenli
Analiz.

Özet: Bu çalışmada Yozgat İli sınırları içerisinde yer alan içme, tarımsal sulama ve diğer amaçlı yeraltı su kaynaklarının hidrojeokimyasal özellikleri ve su kalitesinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında 2016-2019 yılları arasında il sınırları içerisinde yer alan 12 ilçedeki 79 kuyudan alınan su numunelerinin analiz sonuçları incelendi. Su örneklerinin hidrojeokimyasal değerlendirilmesi Piper diyagramı, Spearman korelasyonu, Gibbs diyagramı, Cluster analizi ve Faktör analizine göre yapılmıştır. Su kalitesi içme suyu, kullanım ve tarımsal sulama ile ilgili standart ve yönetmeliklere göre değerlendirildi. Spearman korelasyon analizi sonuçlarına göre en yüksek ilişkiler elektriksel iletkenlik (EC), sülfat (SO₄) ve toplam çözülmüş katılar (TDS) arasında gözlemlendi. Bölgede Ca-Mg-Cl'li su ve Ca-Mg-HCO₃'lü su olmak üzere iki farklı yeraltı suyu mevcut olup, kaya baskın mekanizmasının su kaynaklarının kalitesi üzerinde etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Kümeleme analizi birbirine yakın bölgelerin benzer jeolojik yapı nedeniyle benzer su özelliklerine sahip olduğunu göstermiştir. Faktör analizinde, Faktör 1 toplam varyansın %41'ini oluşturmaktadır. Ayrıca bölgedeki su kaynaklarının kullanıma ve tarımsal sulamaya uygun olduğu tespit edilmiştir.

*İlgili Yazar, email: nuraya@erciyes.edu.tr

1. Introduction

Water is a fundamental element for the existence and thriving of humans and other living beings [1]. With industrialization, agriculture, and population growth, the demand for freshwater resources is increasing day by day. Additionally, climate change alters the natural environment, making the protection of our water resources more challenging. Although surface waters such as lakes and rivers are the main readily available freshwater sources, their availability is relatively limited on a global scale. Thus, the reliance on groundwater to supply water needs has been increasing in recent times [2]. Groundwater with high water quality is an important and reliable source and can primarily be used as a source of drinking water [3]. In addition, groundwater plays a vital role in various sectors, including agriculture, livestock, industry, and mining [4,5]. In recent years, characterizing the hydrogeochemical characteristics of groundwater is becoming more important, particularly as more and more places rely on it for drinking and irrigation. In order to use groundwater resources more effectively, their hydrogeochemical properties need to be well understood, and they need to be continuously monitored and evaluated [6,7].

The literature highlights the significance of hydrogeochemical research in developing sustainable groundwater management strategies to tackle issues related to water supply and quality in different parts of the world. A study by Nagarajan et al. [8] examined 102 groundwater samples from Thanjavur, India, with particular attention to main ions, pH, electrical conductivity (EC), temperature, and nitrates. According to their findings, Na and Cl ions predominated in 90% of the samples, and a sizable percentage of the water types were Ca-Mg-Cl type waters. The study demonstrated the negative effects of human activity on groundwater quality, highlighting how urgent it is to implement practical conservation measures. Similarly, the hydrogeochemical characteristics of the surface and groundwater of the Aksu (Isparta) Plain were assessed by Şener and Güneş [9]. The waters were mostly in the Ca-HCO₃, Mg-HCO₃, and Ca-Mg-HCO₃ water facies, according to the analytical results based on the Piper diagram. In the same manner, Piper, Schoeller, Wilcox, and US Salinity Laboratory diagrams were used to assess hydrogeological formations in the study of Küçükatabey [10] in Gemici Village (Baskil). The predominant anion was found to be HCO₃, and the predominant cation was found to be Ca in the water from 11 wells and 3 springs. In the Middle Ganga Basin of India, research by Patel et al. [7] research on the shallow aquifer system, revealing that the groundwater is slightly alkaline with a cation dominance order of Na > Ca > Mg > K and an anion dominance of bicarbonate (HCO₃). Their findings highlight the critical reliance on groundwater in the region for both irrigation and drinking purposes, alongside observed reductions in water quantity and quality. Ren et al. [11] utilized multivariate statistical techniques, including Principal Component Analysis (PCA) and Factor Analysis (FA), to dissect the hydrogeochemical dynamics within the central Guanzhong Basin, pinpointing mineral dissolution/precipitation and human influence as primary determinants of groundwater quality. Barzegar et al. [12] focused on identifying the main factors deteriorating groundwater quality in the Hoy Plain, northwest Iran, using the PHREEQC model and Piper diagram. Their findings indicated that the majority of samples from free aquifers and all samples from confined aquifers fell within the Ca-Mg-HCO₃ type, suggesting various processes and factors could influence water quality in the region. Ates et al. [3] evaluated 28 physicochemical variables for groundwater in the stratovolcano aquifers of Mount Erciyes over a period of 12 months at 13 sampling stations. All water samples exhibited roughly similar characteristics, with some variations in ion concentrations. All water samples were of the Ca-Mg-HCO₃ type, with Ca and Mg as the dominant cations and HCO₃ as the dominant anion. The saturation index results indicated that the water samples were almost saturated with carbonate minerals but undersaturated with SO₄ minerals. In the study of Bozdağ [13] on the Konya Plain, hydrogeochemical properties and suitability for irrigation of groundwater was analyzed, using seven parameters and Wilcox and US Salinity Laboratory diagrams. The study revealed dominant Ca and Mg cations and an anion facies progression from HCO₃ to SO₄-Cl. It found that the Late Pliocene-Quaternary aquifer, especially near Üçhüyükler, Ovakavağı, and Karkın, was adversely affected by agricultural and anthropogenic activities, making it unsuitable for irrigation purposes.

Furthermore, studies by Ghoraba and Khan [14] in Pakistan, Ke et al. [15] in the Qinghai-Tibet Plateau's permafrost regions of China, Kortatsi et al. [16] in Ghana's Offin Basin, Mukherjee and Singh [17] in five main river basins of India, Abdelshafy et al. [18] in Sohag, Egypt, Li et al. [19] in northwest China, Malik et al. [20] in Rajasthan, India, Krishna Kumar et al. [21] in Tamil Nadu, India, and Wu et al. [22] in the Hangjinqi gas field area, Northwest China, further contribute to our understanding of groundwater's hydrogeochemical characteristics. These studies collectively highlight the complex interplay of geological and anthropogenic factors in shaping groundwater quality across diverse ecological and climatic zones.

The objective of this research is to assess the quality of Yozgat Province's groundwater and identify its hydrogeochemical characteristics by analyzing groundwater sample material. This study examined the water quality of 79 wells located in 12 districts between 2016 and 2019 using data of the DSI 12th Regional Directorate about irrigation water sources. Water sample analysis was performed using hydrogeochemistry. Water quality was evaluated according to standards and regulations regarding drinking water, utility, and agricultural irrigation. The novelty of this study lies in its comprehensive hydrogeochemical assessment of groundwater resources across Yozgat Province, using a robust dataset of water samples collected from 79 wells over a three-year period (2016-2019). Key findings include the identification of two distinct groundwater types linked to geological characteristics, and insights into how regional geological similarities influence water quality. The study also demonstrates that a significant portion of the variance in water characteristics is explained by factor analysis, underscoring its importance in understanding regional water resources. Overall, the research confirms the suitability of the region's water for its intended uses, grounding its conclusions in comprehensive data and advanced analytical methods.

2. Description of the Study Area

This study covers Yozgat Province and its surroundings, located on the Bozok Plateau of the central Kızılırmak in the Central Anatolia Region. It is surrounded by Orum, Amasya, Tokat in the north, Sivas in the east, Kayseri and Nevşehir in the south, and Kırşehir and Kırıkkale in the west [23]. Yozgat Province is 1,300 meters above sea level and has a land area of 1,407,200 hectares. It is located between 34°05'–36°10' eastern meridians and 38°40'–40°18' northern parallels. The distance between the eastern and western ends of the province is 216 kilometers as the crow flies, and the distance between the northern and southern ends is 144 kilometers [23]. The location map of the research area is given in Figure 1.

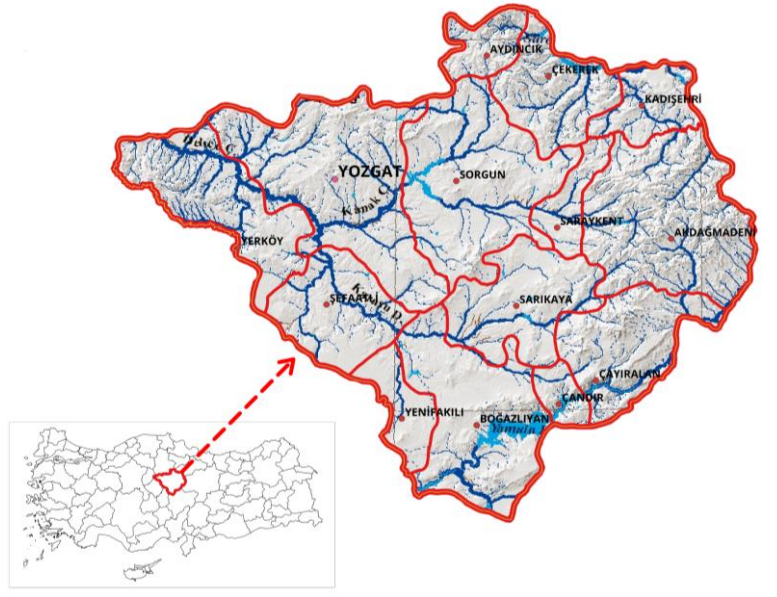


Figure 1. Map of Yozgat Province showing districts and rivers

Çekerek River, which drains the waters of the northern part of Yozgat, is one of the important tributaries of Yeşilirmak. It originates from the Çamlıbel Mountains within the borders of Sivas Province, flows from the south of the Deveci Mountains to the west and enters the borders of Yozgat Province. Delice River, one of the major branches of Kızılırmak, originates from the western foothills of the Akdağlar as a spring water, and reaches Şefaatli by taking the Sorgun stream, which collects the waters of Merkez, Sorgun and Doğan kent. Here, it merges with the Karacaali Essence, which grows with the waters of Boğazlıyan and its surroundings and takes the name Delice River. There are no fish farms in the rivers of Yozgat region. However, trout farming is done on natural and artificial lakes formed by feeding streams. There is a 950 ton/year trout production facility on the Uzunlu Dam Pond, fed by the Delice River, a 450 ton/year trout production facility on the Gelingüllü Dam Pond, also fed by the Delice River, and a 200 ton/year trout production facility on the Yahyasaray Dam Pond, fed by the Çekerek River. There is no natural lake within the borders of Yozgat. However, 4.5 km away from Boğazlıyan district. There is a small lake in the source part of the Cavlak Thermal Spring located in the west, which the local people call "Cavlak Lake" [24].

3. Material and Methods

Hydrogeochemical studies can be examined in three stages: sampling, analysis, and evaluation. The results of the water quality analysis evaluated in this study were obtained from the DSI 12th Regional Directorate. The data covers analysis results taken from a total of 79 wells in 12 districts between 2016 and 2019 once in a year. Within the scope of the study, pH, EC, Na, K, Ca, Mg, CO₃, HCO₃, Cl, SO₄, % Na, SAR, hardness, NO₂, NO₃, NH₄, organic matter, and TDS parameters were evaluated. Water samples were collected from 13 wells in the Central district of Yozgat Province; 8 in Yerköy; 7 in Şefaati; 9 in Sarıkaya; 7 in Sorgun; 9 in Çayıralan; 2 in Kadişehir; and 2 in Saraykent. A total of 79 wells were sampled, including 3 in Çandır, 1 in Çekerek, 8 in Akdağmadeni, and 12 in Boğazlıyan. The pH determination in groundwater was made using the TS EN ISO 10523 electrometric method. The EC value in water was determined using the TS 9748 EN 27888 method. Parameters analyzed included Na, % Na, K, Ca, Mg, NH₄, and SAR, within the scope of the TS EN ISO 14911 method. CO₃ and HCO₃ were analyzed using TS 3790 EN ISO 9963-1; Cl, SO₄, NO₂, and NO₃ were analyzed using TS EN ISO 10304-1; and organic matter according to TS 8195 EN 1484 methods. Standard methods were also used to analyze hardness and TDS parameters.

In this study, the annual average values and descriptive statistics (minimum, maximum, and standard deviation) values of the analysis results for 12 regions on a district basis according to the regional years between 2016 and 2019 were calculated with the help of the Excel program. Based on average values obtained from 2016 to 2019, the use of groundwater in the Yozgat region for drinking water purposes was evaluated according to TS 266-Water Intended for Human Consumption [25], the Regulation on Water Intended for Human Consumption [26], and the Regulation on the Protection of Groundwater Against Pollution and Deterioration [27]. Additionally, using the US Salinity Laboratory Diagram according to the Regulation on the Protection of Groundwater Against Pollution and Deterioration [28], its suitability for domestic and agricultural irrigation purposes was also assessed.

A normality test was performed with the analysis results of the samples taken from the region. Then, hydrogeochemical evaluations of groundwater were made using Spearman correlation, piper diagrams, clustering analysis, Gibbs diagrams, factor analysis, and anion cation relationships. Hypothesis tests can be used when evaluating normality [29]. In this study, a normality test was performed with the Shapiro-Wilk method using the Past program. The Spearman correlation is the non-parametric version of the Pearson correlation coefficient. It is used in non-normal data where parametric assumptions are not met. While there is a linear relationship in Pearson correlation, a non-linear relationship is mentioned in Spearman correlation [30]. In order to statistically evaluate the correlation relationship in groundwater analysis results, the Spearman correlation analysis method within the Excel program was used. Spearman correlation analysis was performed for a total of 17 parameters. Yozgat region groundwater analysis results were created by piper diagrams using the GW_Chart program. The GW_Chart program is a special graphics creation program used in groundwater research. Developed by the United States Geological Survey (USGS) [31]. In order to classify Yozgat Province groundwater quality data, Euclidean distance was used to calculate the differences between intermittent measurement levels in the past program. In the clustering analysis, the "Progressive Clustering (Hierarchical Cluster)" method was used. The Past program is a data analysis application developed by Oyvind Hammer for Windows [32]. In principal component analysis, the Scree test graph (line graph) shows the total variance related to each component. The components up to the point where the graph becomes horizontal are considered the maximum number of components to be obtained [33]. In the factor analysis conducted in this study, principal component analysis was applied using the Past program, and a Scree test graph was drawn.

To examine the anion-cation relationship in the region, graphs of anions and cations were created using Ca, Mg, Na, K, Cl, SO₄, and HCO₃ ions in groundwater using the Excel program. The chemical composition of water depends on many parameters, such as the chemical composition of the rock it is in contact with, the flow rate of groundwater, temperature, ambient pressure, ion activity, and ambient pH [34]. Ion activity is very important to determine the usability of groundwater and in which areas it can be used. For this reason, in order to examine the anion-cation relationship in the region, graphs of anions and cations were created using Ca, Mg, Na, K, Cl, SO₄, and HCO₃ ions in groundwater using the Excel program. Anion-cation relationships were evaluated in the graphs created.

4. Results

4.1. Hydrochemical characteristics of the water samples

In this study, hydrogeochemical evaluation was carried out in three stages. i) The groundwater quality data from the region were statistically analyzed for suitability as drinking water, in accordance with TS 266 Water Intended

for Human Consumption [25] and the Regulation on Water Intended for Human Consumption [26]. ii) The suitability of groundwater for agricultural irrigation was evaluated using the US Salinity Laboratory Diagram and the Regulation on the Protection of Groundwater Against Pollution and Degradation. iii) Groundwater quality data were further analyzed through hydrogeochemical methods, including Spearman correlation, Piper diagram, cluster analysis, Gibbs diagram, and anion-cation relationship studies.

The average values of the water quality parameters between 2016 and 2019 were presented for 12 regions in Yozgat Province and given in Table 1. Besides, descriptive statistics were computed and shown in the table. pH values indicated almost neutral conditions, ranging from 7.49 to 7.88 in samples from 12 districts, with an average of 7.67. The conductivity of the samples varied from 539 to 1382 $\mu\text{S}/\text{cm}$, with an average of 774 $\mu\text{S}/\text{cm}$. The content of dissolved solids is linked to the conductivity of water samples. The total dissolved solids content (TDS) of the water samples is a parameter related to the conductivity and was determined to be 57–77% (average 69%) of the conductivity (Freeze and Cherry, 1979).

Table 1. The physicochemical characterizations of groundwater samples in Yozgat Province (2016-2019).

District	pH	EC	Na	K	Ca	Mg	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄	% Na	SAR ^a	T.H. ^b	NO ₂	NO ₃	NH ₄	TOC ^c	TDS ^d
Unit	-	µS/cm	mg/L															
Merkez	7.65	682	45.8	1.6	78.0	22.2	0.1	391.6	8.6	43.6	22	1.55	284	0.14	32.6	0.18	0.61	465
Yerköy	7.75	1298	167.8	3.4	88.1	50.6	0.1	420.7	46.2	309.6	41	3.31	428	0.14	31.1	0.07	0.97	801
Şefaati	7.70	1382	121.1	2.6	176.3	32.8	0.0	358.2	30.0	455.5	37	5.87	575	0.52	42.5	0.58	0.97	1065
Sarıkaya	7.81	637	46.3	1.2	77.3	12.1	1.3	312.4	16.9	34.3	27	2.29	242	0.2	42.7	0.08	0.82	433
Sorgun	7.59	695	30.2	2.0	91.4	24.3	0.0	396.6	5.1	45.6	14	0.77	328	0.14	31.4	0.09	0.84	475
Çayıralan	7.49	539	4.8	1.7	107.1	7.9	0.0	345.0	2.3	16.2	3	0.12	300	0.14	19.3	0.07	0.65	373
Boğazlıyan	7.63	906	53.8	5.3	106.1	30.5	0.0	351.0	39.8	108.6	18	1.02	393	0.22	93.1	0.07	0.95	665
Akdağmadeni	7.57	541	6.5	2.5	100.1	8.9	0.0	341.3	1.8	11.8	5	0.17	286	0.16	14.5	0.17	0.79	309
Saraykent	7.60	632	14.6	1.9	104.6	15.4	0.0	380.4	5.8	22.7	9	0.33	324	0.16	13.2	0.08	0.6	416
Kadışehir	7.71	842	36.4	8.6	79.6	45.1	0.0	406.8	14.4	86.3	13	0.73	384	0.2	53.2	0.08	0.56	628
Çekerek	7.73	568	14.6	2.1	65.4	33.3	0.0	359.7	4.1	24.1	10	0.37	300	0.14	5.5	0.06	0.61	371
Çandır	7.88	563	27.3	1.7	75.7	12.6	0.2	323.8	6.9	16.2	22	0.83	241	0.18	51.7	0.07	1.46	389
Min	7.49	539	4.8	1.2	65.4	7.9	0.0	312.4	1.8	11.8	3	0.12	241	0.14	5.5	0.06	0.56	309
Max	7.88	1382	167.8	8.6	176.3	50.6	1.3	420.7	46.2	455.5	41	5.87	575	0.52	93.1	0.58	1.46	1065
Average	7.67	774	47.5	2.9	95.8	24.7	0.2	365.6	15.2	97.9	18	1.45	340	0.19	35.9	0.13	0.82	532
Std.Dev.	0.11	289	49.0	2.1	28.8	14.1	0.4	33.7	15.2	139.7	12	1.68	94	0.11	23.6	0.15	0.25	221

^aSAR: Sodium Adsorption Rate

^bT.H: Total Hardness in mg CaCO₃/L

^cTOC: Total Organic Carbon

^dTDS: Total Dissolved Solids

The analysis results of the samples taken between 2016 and 2019 were evaluated according to TS 266) and the Regulation. According to the TS 266, water resources are classified into two classes (Class I Spring water, Class II Waters intended for human consumption other than spring water) and two types (For Class I, only single type and for Class II Type I Processed Spring water, Type II Drinking and process water). Considering the limit values of TS 266, the average EC values from 2016 to 2019 place Sarıkaya, Çayıralan, Akdağmadeni, Saraykent, Kadışehri, and Çekerek districts in Class 1 and Class 2-Type 1 categories. The districts in question are located in the east of Yozgat Province, and due to their similar geological structure, it has been observed that the EC values in the regions close to each other are Class 1 and Class 2-Type 1.

The US salinity laboratory diagram, created using the EC and SAR values in the analysis results of 12 districts in Yozgat Province between 2016 and 2019, is given in Figure 3. Except for Çekerek, Yerköy, Şefaati, and Kadışehri, all of the other districts are in the C2-S1 class. C2 refers to moderately saline waters. In soils with medium-drainage properties, all plants can be irrigated without the danger of salinity. Low-sodium waters (S1) are those that don't pose a risk of sodium poisoning and can be used in any type of soil. Situated in the C3-S1 zone, the districts of Kadışehri, Çekerek, and Yerköy symbolize saline waters. Irrigating C3 is not done on land with inadequate drainage. Salt-tolerant plants should be chosen in these regions. S1 refers to low-sodium waters and can be used in all soils without creating a sodium hazard. Sefaati district is located in the C3-S2 region, which refers to salt waters. C3 is not used for irrigation on lands with poor drainage. Salt-tolerant plants such as Kadışehri, Çekerek, and Yerköy districts should be chosen. Unlike other districts, it is the only district in the S2 class, which refers to medium-sodium waters. It can be used in permeable or abundant gypsum lands.

The purpose of the regulation on the protection of groundwater from pollution and deterioration is to establish essential guidelines to preserve groundwater in its current good condition, prevent its contamination and degradation, and enhance the quality of these water sources. The quality standard for nitrates in the Annex-2 list of groundwater quality standards is 50 mg/L. When the water quality of Yozgat Province was evaluated, only the average values of Çandır district remained below this quality standard.

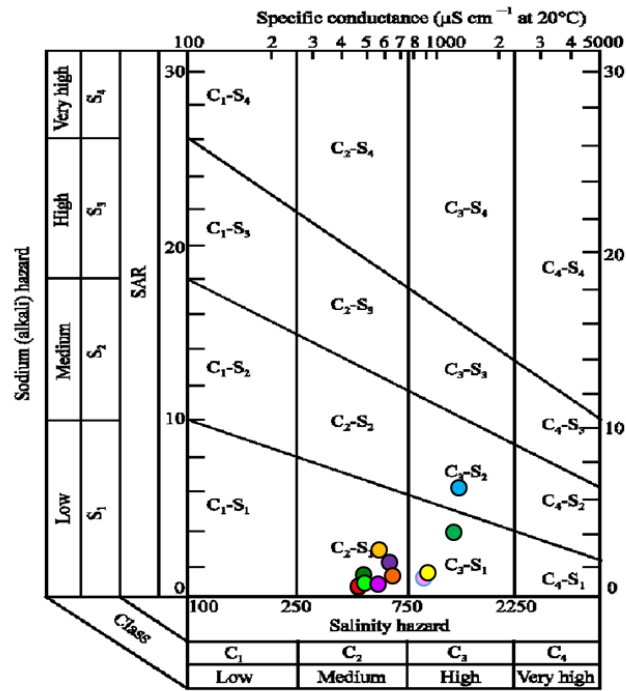


Figure 2. USA salinity laboratory diagram for well analysis in Yozgat Province.

4.2. Hydrogeochemical analysis in groundwater

4.2.1. Normality test

pH, EC, Na, K, Ca, Mg, CO₃, HCO₃, Cl, SO₄, SAR, hardness, NO₂, NO₃, NH₄, organic matter, and TDS, using the district-based average values of Yozgat Province groundwater quality data between 2016 and 2019. A normality test was applied to a total of 17 parameters. In normality test applications, if it is significant at the $p < 0.05$ level, the hypothesis is rejected, and the distribution is decided to be non-normal. However, if a $p > 0.05$ value is obtained, the hypothesis is accepted, and it is interpreted that the distribution does not differ significantly from the normal distribution [35]. Data for Yozgat Province do not show a normal distribution since the p (normal) values for some of the EC, Na, K, Ca, CO₃, Cl, SO₄, SAR, NO₂, NH₄, organic matter, and TDS parameters are below 0.05.

4.2.2. Spearman correlation analysis

Hydrogeochemical assessments in the study area were conducted using Spearman correlation analysis on its groundwater. This analysis included variables such as pH, EC, Na, K, Ca, Mg, CO₃, HCO₃, Cl, SO₄, SAR, hardness, NO₂, NO₃, NH₄, organic matter, and TDS. The findings reveal a lack of significant correlation between the pH levels and other measured parameters. EC demonstrated a notably high positive correlation with Na at 0.93 and exhibited substantial positive correlations with SO₄ and TDS at 0.97, with Cl at 0.85, SAR at 0.86, and hardness at 0.91. While Na showed a significant positive correlation with Cl (0.86), SO₄ (0.88), TDS (0.84), and SAR (0.84), it only had a minimal correlation with CO₃ at 0.06. K did not show any strong correlation with the studied parameters. Ca, however, had a strong positive correlation with NO₂ (0.86) and NH₄ (0.85), whereas Mg did not show any significant correlations. CO₃ and HCO₃ generally demonstrated a negative and weak correlation with other parameters. The positive correlation between Na and Cl, SO₄, and the strong positive correlation between Cl and SO₄ in the groundwater of the Korkuteli Antalya area share similarities with the groundwater of the Yozgat region. However, the correlations of many other ions do not match [36].

4.2.3. Piper diagram

The Piper diagram presented in Figure 4 indicates that the Akdağmadeni and Kadışehri wells fall within the IV region, characterized by Ca-Mg-Cl type waters. Analytical results from wells located in the Merkez, Yerköy, Şefaati, Sarıkaya, Sorgun, Çayıralan, Boğazlıyan, Saraykent, Çekerek, and Çandır areas show that the waters in these regions are of the Ca-Mg-HCO₃ variety. Since the samples taken from these regions are closer to each other and tend to cluster, it can be said that they have similar hydrochemistry. If we evaluate the regions in terms of cations, Ca is below 50% only in the waters of the Kadışehri region, as seen in Figure 10. In well analyses, it is seen that the Mg value is generally 50% or below. Especially the Mg percentage of the waters in the Çekerek region is quite low. If we look at Na+K values, we can say that they vary from region to region in the range of 25-75%. As for anions, CO₃+HCO₃ is quite high in many regions. It is approximately 40-50% in the Kadışehri and Akdağmadeni regions, and the lowest CO₃+HCO₃ values are observed in these regions. Cl anion values are generally below 50%; the highest Cl rate is in the Akdağmadeni region. It is seen that the SO₄ value is generally 40% and above. The presence of calcium, magnesium, carbonate, HCO₃, chloride, and sulfate in water are the parameters that determine the hardness of water [37].

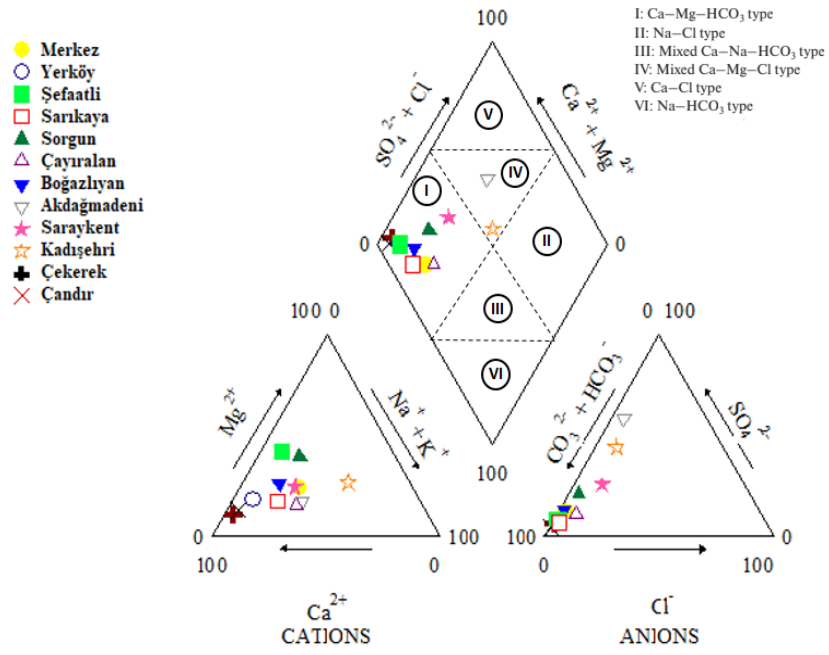


Figure 4. Piper diagram for well analysis in Yozgat Province.

Table 2. Sperman correlation analysis results of groundwater quality data of Yozgat Province.

	pH	EC	Na	K	Ca	Mg	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄	SAR	Hardness	NO ₂	NO ₃	NH ₄	Org Matt.	TDS
pH	1																
EC	0.20	1															
Na	0.35	0.93	1														
K	0.02	0.32	0.14	1													
Ca	-0.29	0.60	0.38	-0.02	1												
Mg	0.26	0.72	0.68	0.64	0.02	1											
CO ₃	0.50	-0.13	0.06	-0.29	-0.26	-0.27	1										
HCO ₃	-0.19	0.43	0.41	0.43	-0.06	0.72	-0.50	1									
Cl	0.27	0.85	0.86	0.36	0.32	0.66	0.07	0.26	1								
SO ₄	0.19	0.97	0.88	0.17	0.72	0.60	-0.13	0.30	0.74	1							
SAR	0.35	0.86	0.84	-0.04	0.66	0.41	0.19	0.09	0.65	0.92	1						
Hardness	-0.06	0.91	0.71	0.39	0.78	0.64	-0.37	0.40	0.66	0.92	0.76	1					
NO ₂	0.16	0.66	0.45	0.11	0.86	0.19	-0.02	-0.16	0.38	0.77	0.81	0.78	1				
NO ₃	0.27	0.33	0.25	0.52	0.13	0.25	0.12	-0.11	0.59	0.21	0.20	0.26	0.29	1			
NH ₄	0.00	0.59	0.41	-0.09	0.85	0.10	-0.13	-0.05	0.22	0.74	0.79	0.71	0.91	0.04	1		
Org Matt.	0.57	0.21	0.31	-0.17	0.12	-0.08	0.14	-0.37	0.31	0.25	0.29	0.05	0.24	0.44	0.11	1	
TDS	0.19	0.97	0.84	0.36	0.68	0.67	-0.14	0.35	0.79	0.96	0.87	0.95	0.78	0.42	0.68	0.21	1

4.2.4. Clustering analysis

Clustering analysis performed for well analyses in 12 regions of Yozgat Province was classified as shown in Figure 5. Clustering of 18 parameters (pH, conductivity, Na, K, Ca, Mg, CO₃, HCO₃, Cl, SO₄, Na%, SAR, hardness, NO₂, NO₃, NH₄, organic matter, TDS) to determine the main variables affecting groundwater quality was included in the analysis. In the well analysis conducted in Yozgat Province, water characteristics can be examined in three groups. 1st Group is Sarıkaya, Çandır, Çayıralan, Çekerek, Saraykent, Akdağmadeni, Sorgun, Merkez. The 2nd Group is Boğazlıyan and Kadışehri, and the 3rd Group is Yerköy and Şefaati regions. As can be seen when divided into three groups as a result of cluster analysis, regions close to each other generally have similar water characteristics because they have similar geology. Boğazlıyan Kadışehri region in Yozgat Province and its surroundings is one of the examples that will not be included in this generalization. It is known that Boğazlıyan region is closer to Sarıkaya-Çandır regions than Kadışehri. However, in terms of water features, it is more similar to Kadışehri than other regions. In the clustering analysis, it can be said that the regions that are generally close to each other have similar water properties due to their similar geological structure, as seen in the Sarıkaya-Çandır, Merkez-Sorgun, and Yerköy-Şefaati regions (Figure 5).

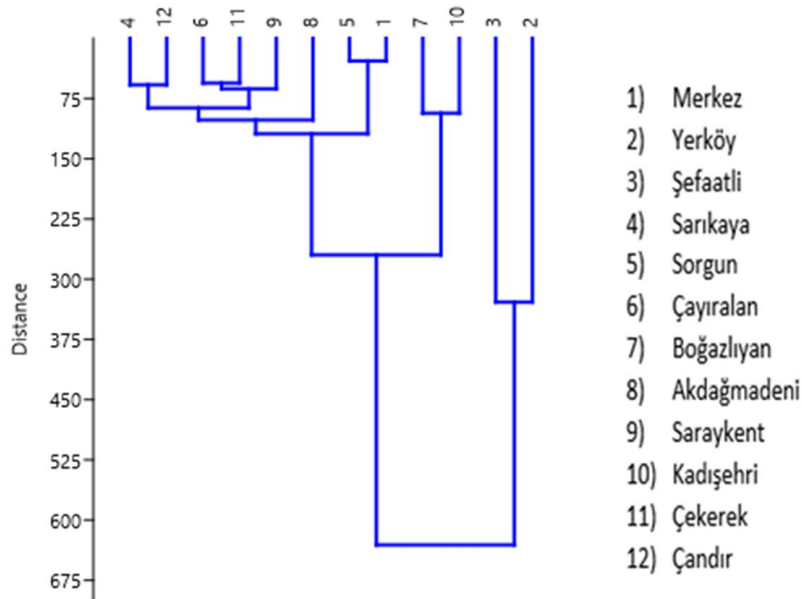


Figure 5. Clustering analysis for well analysis results in Yozgat Province.

4.2.5. Gibbs diagram

The Gibbs diagram developed by Gibbs [39] is frequently used to describe chemical processes that contribute to the evolution of the chemical components of water, such as rock dominance, evaporation dominance, and atmospheric precipitation, as well as to learn more about the sources of dissolved ions in groundwater. Gibbs diagrams were plotted using proportions of anions ($Cl/(Cl+HCO_3)$) and cations ($Na+K/(Na+K+Ca)$) opposed to the concentration of TDS. The interaction between the minerals in the aquifer and the groundwater was revealed by the Gibbs diagram of the results of water sample analyses (Figure 6), which showed that the rock dominance process governed the chemical composition of groundwater.

It shows that the groundwater in the region originates from the chemical decomposition of rock-forming minerals, which control the main mechanism in water chemistry [36]. Hydrogeological and hydrogeochemical properties of surface and groundwater in the east of Şefaati district of Yozgat Province were examined by Şener and Şener [38]. When the parameters of the region's waters were placed on the Gibbs diagram, it was concluded that all water samples were in the rock dominant class, as found in this study.

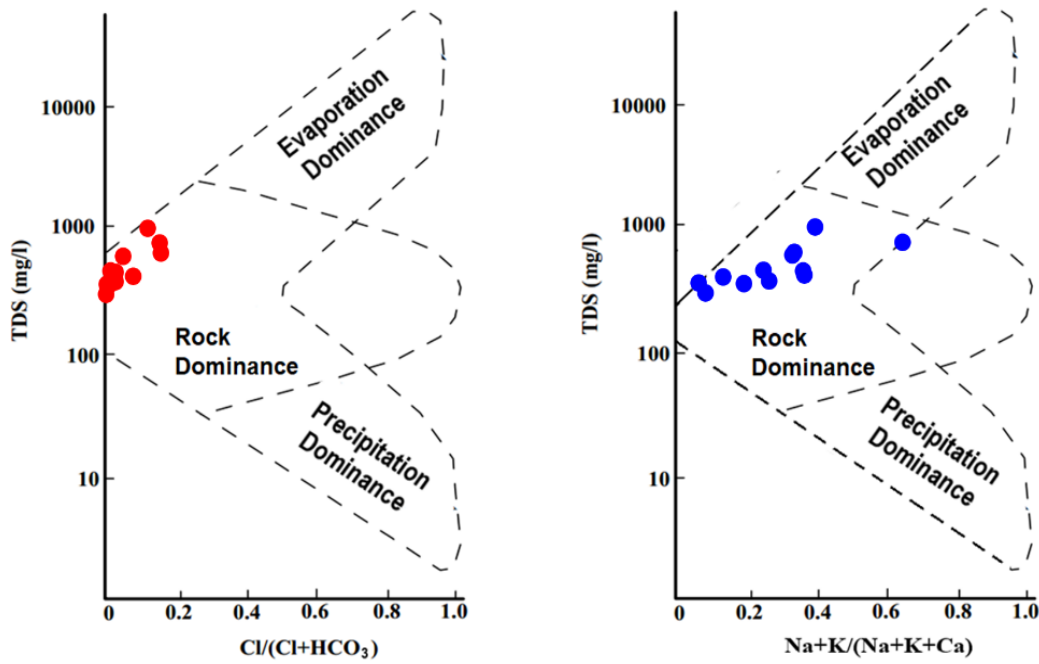


Figure 6. Gibbs's diagram showing the controlling mechanisms for groundwater chemistry of Yozgat Province.

4.2.6. Factor analysis/PC analysis

As a result of the principal components analysis, variance percentages were fixed at Factor 7. As a result of the analysis, the values of a total of seven factors are given in Table 3. The most effective ions in Factor 1 are HCO_3 and Mg in the positive direction, as seen in Table 3. In factor 2, Ca and Cl ions show the most positive effect. Considering factor 3, the most negatively active ion is Ca. The scatter chart of the factor analysis and principal component analysis conducted for the Yozgat region shows the amount of variance explained by each factor. In this study, 12 parameters (pH, K, Ca, Mg, CO_3 , HCO_3 , Cl, % Na, SAR, hardness, NO_2 , NO_3) were analyzed. Before the analysis, the data series were normalized, and data with high correlations and data with very low variance were removed. The first factor (PC) shows the highest variance, and the last factor shows the lowest variance. As a result of the analysis, the highest variance is 41% in factor 1, and this factor constitutes 41% of the total variance. Factor 2 accounts for 32% of the total variance, and factor 3 accounts for 19% of the total variance. The remaining factors each account for less than 10% of the total variance (Figure 7).

Table 3. Factor values.

Parameters	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5	PC 6	PC 7
pH	-0.00030	-0.41797	0.00228	0.00503	-0.00051	0.01064	0.01285
K	0.02862	0.00933	0.03719	-0.06131	0.14471	0.02717	0.97843
Ca	0.04820	0.79810	-0.52672	-0.17604	-0.02971	0.01315	0.00674
Mg	0.32494	0.06095	0.15926	0.27284	0.71099	0.36509	-0.10772
CO_3	-0.00472	-0.00057	0.00501	0.01398	-0.01457	0.00494	0.11244
HCO_3	0.90384	-0.19464	-0.11068	-0.27092	-0.23645	-0.05913	0.00042
Cl	0.19472	0.28682	0.27824	0.46050	0.04300	-0.76622	0.02573
% Na	0.12163	0.17791	0.12373	0.60952	-0.56260	0.47623	0.08813
SAR	0.01272	0.03797	-0.00569	0.06883	-0.03943	0.08907	0.06012
Hardness	0.14551	0.22551	-0.06427	0.06716	0.29075	0.14613	-0.06074

NO₂	0.00959	0.00292	-0.00079	0.00088	0.00165	0.00781	0.00635
NO₃	0.01675	0.39387	0.76593	-0.47367	-0.10999	0.13755	-0.04941

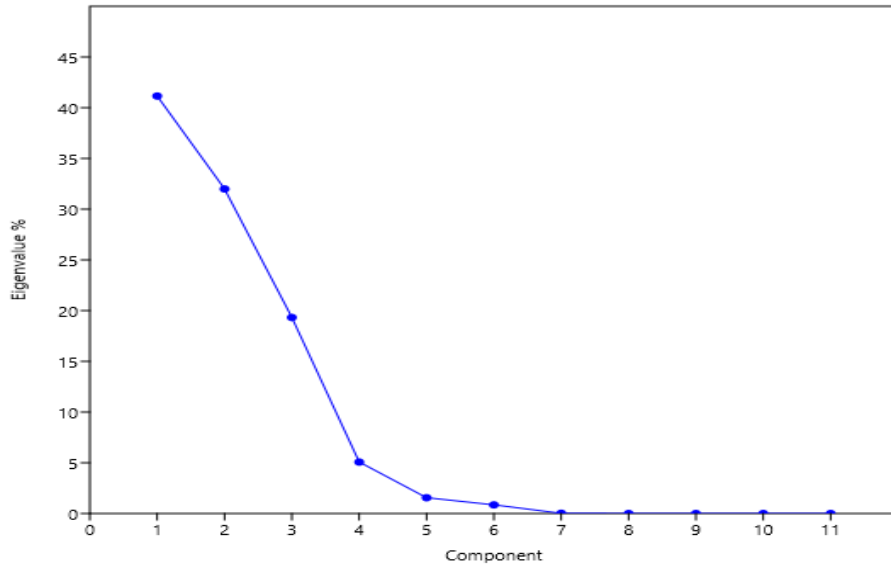


Figure 7. Scree test graph

4.2.7. Relationships between cations and anions in groundwater samples

The abundance states of ions in the study area are related to hydrogeochemical processes in the aquifer system. Different diagrams were prepared to explain these processes, and comments were made based on these diagrams. The relationships between anions and cations are given in Figure 8. Between Na and Cl, R^2 is 0.87 (Figure 8a). The R^2 value in the Na-SO₄ relationship given in Figure 8b is 0.78. Na has a stronger relationship with SO₄ compared to Mg and the least related ions are Mg and SO₄ ions. It can be seen in Figure 8c that the R^2 value in the relationship between Mg and HCO₃ is 0.88. As seen in Figure 8d, the Mg-SO₄ relationship is quite low with the coefficient value (R^2) of 0.56. There is a strong relationship ($R^2 = 0.98$) between Ca+Mg and HCO₃+SO₄ (Figure 8e). In general, carbonates and silicates are the main sources of mineralization in water. The Ca+Mg and HCO₃+SO₄ diagrams show the dominant weathering types in groundwater. When the anion-cation relationships in the study area are evaluated, the strongest relationship is seen between Ca+Mg and HCO₃+SO₄ ($R^2 = 0.98$).

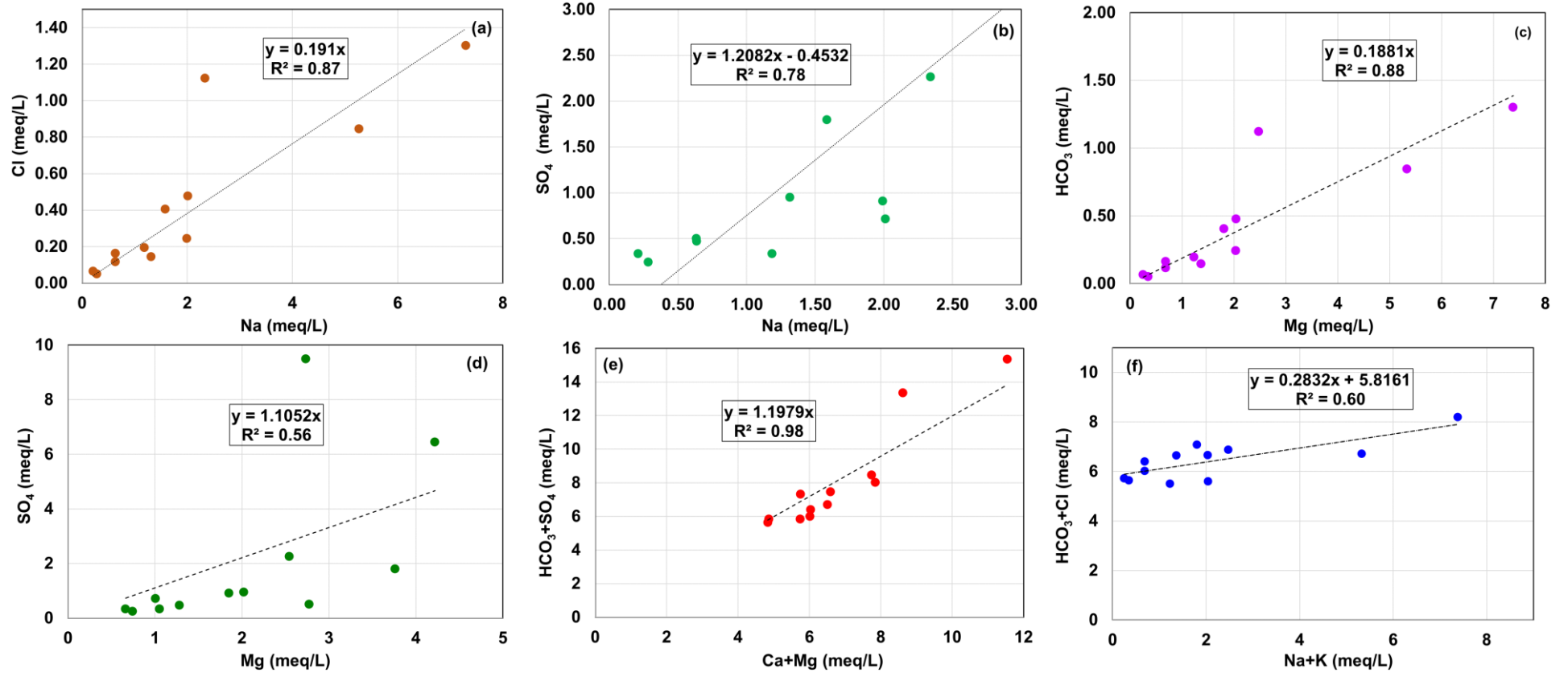


Figure 8. Anion-cation relationships in groundwater samples

5. Discussion and Conclusion

In this study, it was aimed at evaluating the hydrogeochemical data on the groundwater quality of Yozgat Province and its surroundings. The analysis results of water samples were obtained from the 12th Regional Directorate of State Hydraulic Works. pH, EC, Na, K, Ca, Mg, CO₃, HCO₃, Cl, SO₄, % Na, SAR, hardness, NO₂, NO₃, NH₄, organic matter, and TDS parameter analysis results were used in water quality and hydrogeochemical evaluation. The groundwater quality of the region was evaluated according to TS 266 and the Regulation on Water for Human Consumption, and its suitability for use and agricultural irrigation was evaluated according to the US Salinity Laboratory Diagram and the Regulation on the Protection of Groundwater against Pollution and Deterioration. Hydrogeochemical evaluation of water resources was examined according to Sperman correlation, Piper diagram, Gibbs diagram, cluster analysis, factor analysis, and anion-cation relationships.

As a result of the evaluation according to TS 266 and the Regulation on Water Intended for Human Consumption, average pH values were found to be between 6.5 and 9.5 limit values in all water samples. The TDS value of water samples is a parameter related to EC and represents an average of 69% of the conductivity. The variation in proportional relationships between EC (120–5600 µS/cm) and TDS (0.05–2.5%) may be associated with the type of salinity and the proportionality coefficient, which ranges from 2.22 to 3.16 [40]. On the other hand, solutions with higher concentrations of divalent ions exhibit lower electrical conductivity compared to those with monovalent ions at similar ionic strengths, highlighting the effect of ion pairing. Due to significant errors in high salinity ranges, a specialized correlation should be developed to accurately represent saline waters with similar chemical compositions [41].

The average values of NH₄ in Şefaati district, SO₄ in Yerköy and Şefaati districts, and NO₃ in Boğazlıyan, Kadışehri, and Çandır districts were observed to be above the limit values according to the TS 266 and the Regulation, and it was determined that it was not suitable for use as drinking water due to presence of nitrate. Within the scope of the regulation on the protection of groundwater against pollution and degradation, the quality standards for nitrates are stated as 50 mg/L in the Annex-2 list of groundwater quality standards. When the water quality of Yozgat Province was evaluated, only Çandır district remained below this quality value.

As a result of the normality test applied to the sample analysis results taken from the region, an evaluation was made with Spearman correlation since the results did not show a normal distribution. The highest correlation relationships were observed between EC, SO₄, and TDS with a coefficient of 0.97. On the other hand, a strong positive correlation was observed between conductivity and Cl, SAR, and hardness at values of 0.85, 0.86, and 0.91, respectively. The Piper diagram created with the analysis results of a total of 12 districts revealed that Akdağmadeni and Kadışehri groundwaters are Ca-Mg-Cl type waters. The waters in the Merkez, Yerköy, Şefaati, Sarıkaya, Sorgun, Çayıralan, Boğazlıyan, Saraykent, Çekerek, and Çandır regions are Ca-Mg-HCO₃ type waters. It was understood that the samples taken from these regions had similar chemical structures due to the similar geological structure of the districts and their tendency to cluster. In the study conducted by Şener and Şener [38], the hydrogeological and hydrogeochemical properties of surface and groundwater in the east of Şefaati district of Yozgat Province were examined. It was concluded that it is in the Na-Ca-HCO₃, Ca-Mg-HCO₃, and Ca-Mg-HCO₃-SO₄-type water facies. The findings obtained in this study support the results obtained in our study.

Cluster analysis was performed to identify the main variables affecting groundwater quality. In the clustering analysis, it is seen that the regions that are close to each other have similar water characteristics due to their similar geological structure, as seen in the Sarıkaya-Çandır, Merkez-Sorgun, and Yerköy-Şefaati regions. Based on the Gibbs diagram, it is evident that all the waters within the area fall under the category dominated by rock interactions. This indicates that the region's groundwater is derived from the chemical breakdown of minerals that form rocks, which dictate the primary processes influencing water chemistry. According to factor analysis/Principal Components analysis, Factor 1 has the highest variance (41%). The variance of Factor 2 was 32% and Factor 3 was 19%, and each of the remaining factors constituted less than 10% of the total variance. In Factor 1, the most effective ions were HCO₃ and Mg in a positive direction. In Factor 2, Ca and Cl ions showed the most influence in a positive direction. In factor 3, the most negatively active ion is Ca.

When the anion-cation relationships in the study area are evaluated, the strongest relationship is seen between Ca+Mg and HCO₃+SO₄ ($R^2 = 0.87$). When the relationship between Ca+Mg and HCO₃+SO₄ was evaluated, it was concluded that carbonate dissociation dominated the chemical development of groundwater in the study area. Additionally, it has been observed that Na has a stronger relationship with SO₄ compared to Mg. Among the ions evaluated within the scope of the study, the least related ions are Mg and SO₄ ions. It was concluded that carbonate weathering played a dominant role in the chemical development of groundwater in the study area. The relationship between HCO₃+Cl and Na+K is illustrated in Figure 14f, showing a low correlation with an R^2 value of

0.59. These correlations are likely due to rock-water interactions and ion exchange processes within these groundwater systems. Ates et al. [3] found strong correlations between Ca and Mg, and HCO_3 , indicating that Ca and Mg originate from the weathering of carbonate rocks (calcite, dolomite, and aragonite). In the study by Imbulana et al. [42], TDS showed a stronger correlation with Cl ($R = 0.556-0.797$) than with other major ions such as Ca, SO_4 , Na, HCO_3 , and Mg. Additionally, notable strong correlations were observed between Na and Cl, Ca and SO_4 , Mg and HCO_3 , as well as between Ca and Cl, and SO_4 and Cl. The study by Sunkari et al. [43] identified Na- HCO_3 -Cl as the dominant water type in the area, alongside various mixed water types. The hydrochemical composition of river water and groundwater in the Genggahai Basin is primarily influenced by HCO_3 , resulting from rock weathering and dissolution. The dominant cations are Ca and Na. The presence of evaporite, carbonate, and silicate minerals in the basin significantly affects the water's hydrochemical profile [44].

With the US Salinity Laboratory Diagram, all of the districts except Çekerek, Yerköy, Şefaati, and Kadışehri are in the C2-S1 class. Kadışehri, Çekerek, and Yerköy districts are located in the C3-S1 region. It has been observed that Şefaati district is in the C3-S2 class. According to the US Salinity Laboratory Diagram, it has been observed that groundwater in the region can generally be used for irrigation purposes. The main water source of the Bafra Plain is the Kızılırmak River, one of the saltiest water sources in the country, classified as C3-S1 [45]. Samples taken from Kufi Stream, the primary surface water feeding Işıklı Lake, were classified as C3-S1 [46]. According to the US Salinity Laboratory Classification system, which uses EC and sodium adsorption rate (SAR) values for classification, it has been confirmed as C3-S1 class [47]. The water quality in this region has been reported to range from C3-S1 to C4-S3 [48].

This study evaluated the hydrogeochemical data on groundwater quality in Yozgat Province and its surroundings, utilizing analyses from the 12th Regional Directorate of State Hydraulic Works. It was determined that the groundwater quality fell within acceptable ranges for human consumption and agricultural irrigation according to TS 266 and international regulations, with analyses showing diverse water types and mineral influences predominantly dictated by rock-water interactions and ion exchange processes. The results obtained within the scope of this study can be used in studies related to water management plans and the principles of the study area. Our findings also suggest that groundwater can be used more efficiently in the region, contributing to the environment and economy.

6. References

- [1] Ramachandran, A., Sivakumar, K., Shanmugasundharam, A., Sangunathan, U., Krishnamurthy, R. 2021. Evaluation of Potable Groundwater Zones Identification Based on Wqi and Gis Techniques in Adyar River Basin, Chennai, Tamilnadu, India. *Acta Ecologica Sinica*, 41(4), 285-295.
- [2] Kumar, P.J.S., Augustine, C.M. 2022. Entropy-Weighted Water Quality Index (Ewqi) Modeling of Groundwater Quality and Spatial Mapping in Uppar Odai Sub-Basin, South India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(1), 911-924.
- [3] Ates, N., Dadaser-Celik, F., Kaplan-Bekaroglu, S.S. 2021. Evaluation of Hydrogeochemical Characteristics of Groundwater in Mt. Erciyes Stratovolcano Aquifers. *Geochemistry International*, 59(13), 1324-1340.
- [4] Yüksel, G. 2014. Kayseri İlinin Yeraltı Su Kaynaklarının Hidrojeokimyasal Özellikleri Ve Su Kalitesinin Değerlendirilmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 151s, Kayseri.
- [5] Zhang, Y., Zhang, Q., Chen, W., Shi, W., Cui, Y., Chen, L., Shao, J. 2023. Hydrogeochemical Analysis and Groundwater Pollution Source Identification Based on Self-Organizing Map at a Contaminated Site. *Journal of Hydrology*, 616, 128839.
- [6] Tekocak Yardımlı, B.B. 2017. Aksaray İli Yer Altı Su Kaynaklarının Hidrojeokimyasal Özelliklerinin Coğrafi Bilgi Sistemi Kullanılarak Değerlendirilmesi. *Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray*.
- [7] Patel, A., Rai, S.P., Akpataku, K.V., Puthiyottil, N., Singh, A.K., Pant, N., Singh, R., Rai, P., Noble, J. 2023. Hydrogeochemical Characterization of Groundwater in the Shallow Aquifer System of Middle Ganga Basin, India. *Groundwater for Sustainable Development*, 21, 100934.
- [8] Nagarajan, R., Rajmohan, N., Mahendran, U., Senthamilkumar, S. 2010. Evaluation of Groundwater Quality and Its Suitability for Drinking and Agricultural Use in Thanjavur City, Tamil Nadu, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 171, 289-308.
- [9] Şener, Ş., Güneş, D. 2015. Aksu (Isparta) Ovası Yüzey Ve Yeraltı Sularının Hidrojeokimyasal Özellikleri Ve Su Kalitesi. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 21(6), 260-269.
- [10] Küçükatabey, M.N. 2012. Gemici Köyü (Baskil) Çevresi Yeraltı Sularının Hidrojeokimyasal Özellikleri. *Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 80s, Elazığ.

- [11] Ren, X., Li, P., He, X., Su, F., Elumalai, V. 2021. Hydrogeochemical Processes Affecting Groundwater Chemistry in the Central Part of the Guanzhong Basin, China. *Archives of environmental contamination and toxicology*, 80, 74-91.
- [12] Barzegar, R., Asghari Moghaddam, A., Nazemi, A.H., Adamowski, J. 2018. Evidence for the Occurrence of Hydrogeochemical Processes in the Groundwater of Khoy Plain, Northwestern Iran, Using Ionic Ratios and Geochemical Modeling. *Environmental Earth Sciences*, 77, 1-17.
- [13] Bozdağ, A. 2017. Çumra (Konya) Ovasındaki Yeraltısularının Hidrojeokimyasal Özellikleri Ve Sulama Suyu Kalitesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5(3), 559-571.
- [14] Ghoraba, S.M., Khan, A. 2013. Hydrochemistry and Groundwater Quality Assessment in Balochistan Province, Pakistan. 17(2), 185-199.
- [15] Ke, X., Li, Y., Wang, W., Niu, F., Gao, Z. 2022. Hydrogeochemical Characteristics and Processes of Thermokarst Lake and Groundwater During the Melting of the Active Layer in a Permafrost Region of the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Science of the Total Environment*, 851, 158183.
- [16] Kortatsi, B.K., Tay, C.K., Anornu, G., Hayford, E., Dartey, G.A. 2008. Hydrogeochemical Evaluation of Groundwater in the Lower Offin Basin, Ghana. *Environmental Geology*, 53, 1651-1662.
- [17] Mukherjee, I., Singh, U.K. 2022. Hydrogeochemical Characterizations and Quality Evaluation of Groundwater in the Major River Basins of a Geologically and Anthropogenically Driven Semi-Arid Tract of India. *Science of the Total Environment*, 805, 150323.
- [18] Abdelshafy, M., Saber, M., Abdelhaleem, A., Abdelrazek, S.M., Seleem, E.M. 2019. Hydrogeochemical Processes and Evaluation of Groundwater Aquifer at Sohag City, Egypt. *Scientific African*, 6, e00196.
- [19] Li, P., Wu, J., Qian, H., Zhang, Y., Yang, N., Jing, L., Yu, P. 2016. Hydrogeochemical Characterization of Groundwater in and around a Wastewater Irrigated Forest in the Southeastern Edge of the Tengger Desert, Northwest China. *Exposure and Health*, 8, 331-348.
- [20] Malik, N., Malik, A., Bishnoi, S. 2021. Assessment of Groundwater Hydro-Geochemistry, Quality, and Human Health Risk in Arid Area of India Using Chemometric Approach. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 1-25.
- [21] Krishna Kumar, S., Hari Babu, S., Eswar Rao, P., Selvakumar, S., Thivya, C., Muralidharan, S., Jeyabal, G. 2017. Evaluation of Water Quality and Hydrogeochemistry of Surface and Groundwater, Tiruvallur District, Tamil Nadu, India. *Applied Water Science*, 7, 2533-2544.
- [22] Wu, C., Fang, C., Wu, X., Zhu, G., Zhang, Y. 2021. Hydrogeochemical Characterization and Quality Assessment of Groundwater Using Self-Organizing Maps in the Hangjinqi Gasfield Area, Ordos Basin, Nw China. *Geoscience Frontiers*, 12(2), 781-790.
- [23] ÇŞVİDİM. 2022. Yozgat İl Çevre Durum Raporu. Çevre Şehircilik Ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü. <https://ced.csb.gov.tr/2021-yili-il-cevre-durum-raporlari-i-104268> (2022). Access Date: 25.06.2023.
- [24] AFAD. 2022. İrap İl Afet Risk Azaltma Planı. <https://yozgat.afad.gov.tr/il-planlari> (2022). Access Date: 30.06.2023.
- [25] TSE. 2005. Sular-İnsanî Tüketim Amaçlı Sular. Türk Standartları Enstitüsü Kimya İhtisas Grubu: TS 266, Ankara, 29.04.2005.
- [26] TMOH. 2005. Turkish Ministry of Health (Tmoh), Regulation Concerning Water Intended for Human Consumption, Official Gazette, No. 25730, 17.02.2005, Ankara, Turkey.
- [27] MFWM. 2021. Ministry of Forestry and Water Management (Mfwm), Regulation on the Protection of Groundwater against Pollution and Deterioration, Official Gazette, No. 28257, 25.06.2021. Official Gazette, Ankara, Turkey.
- [28] OSİB. 2012. Orman Ve Su İşleri Bakanlığı (Osİb). Regulation on the Protection of Groundwater against Pollution and Deterioration, Official Gazette, No. 25730, 07.04.2012, Ankara, Turkey.
- [29] Uysal, İ., KILIÇ, A. 2022. Normal Dağılım İkilemi. *Anadolu Journal of Educational Sciences International*, 12(1), 220-248.
- [30] Şen, S. 2023. Korelasyon. <https://sedatsen.files.wordpress.com/2016/11/7-sunum.pdf> (2023).
- [31] USGS. 2020. Gw_Chart. <https://www.usgs.gov/software/gwchart-program-creating-specialized-graphs-used-groundwater-studies> (2020). Access Date: 05.07.2023.
- [32] Hammer, O. 2020. Past Program. <https://past.en.lo4d.com/windows> (2020). Access Date: 01.07.2023.
- [33] Kalaycı, Ş. 2010. Faktör Analizi, Spss Uygulamalı Çok Değişkenli İstatistik Teknikleri, 319-331, Ed. Şeref Kalaycı, 5.
- [34] Gözlü, M. 2022. Çelikhan (Adıyaman) İlçesinin G-Gb' Sının Hidrojeolojik İncelemesi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 84s, Elazığ.
- [35] Greenland, S., Senn, S.J., Rothman, K.J., Carlin, J.B., Poole, C., Goodman, S.N., Altman, D.G. 2016. Statistical Tests, P Values, Confidence Intervals, and Power: A Guide to Misinterpretations. *European journal of epidemiology*, 31(4), 337-350.
- [36] Varol, S., Şekerci, M. 2018. Korkuteli İlçe Merkezi (Antalya) Su Kaynaklarının Su Kalite İndeks (Wqi) Yöntemi İle Değerlendirmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(1), 74-86.

- [37] Nag, S., Suchetana, B. 2016. Groundwater Quality and Its Suitability for Irrigation and Domestic Purposes: A Study in Rajnagar Block, Birbhum District, West Bengal, India. *Journal of Earth Science & Climatic Change*, 7(2), 337-344.
- [38] Şener, Ş., Şener, E. 2021. Şeaaatli (Yozgat) Doğusu Su Kaynaklarının Hidrojeolojik Ve Hidrojeokimyasal İncelemesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 9(1), 126-138.
- [39] Gibbs, R.J. 1970. Mechanisms Controlling World Water Chemistry. *Science China-Life Sciences*, 17, 1088-1090.
- [40] Ismayilov, A.I., Mamedov, A.I., Fujimaki, H., Tsunekawa, A., Levy, G.J. 2021. Soil Salinity Type Effects on the Relationship between the Electrical Conductivity and Salt Content for 1: 5 Soil-to-Water Extract. *Sustainability*, 13(6), 3395.
- [41] Rebello, L.R.B., Siepman, T., Drexler, S. 2020. Correlations between Tds and Electrical Conductivity for High-Salinity Formation Brines Characteristic of South Atlantic Pre-Salt Basins. *Water Sa*, 46(4), 602-609.
- [42] Imbulana, S., Oguma, K., Takizawa, S. 2021. Seasonal Variations in Groundwater Quality and Hydrogeochemistry in the Endemic Areas of Chronic Kidney Disease of Unknown Etiology (Ckdu) in Sri Lanka. *Water*, 13(23), 3356.
- [43] Sunkari, E.D., Okyere, M.B., Adams, S.J., Zango, M.S., Bhattacharya, P., Ali, S. 2023. Geochemical Controls on Fluoride Enrichment in Groundwater of a Geologically Heterogeneous Part of Ghana: Implications for Human Health Risk Assessment. In. Springer.
- [44] Jin, Y., Jin, X., Yang, D., Mao, X. 2019. Controlling Factors of Surface Water Ionic Composition Characteristics in the Lake Gengahai Catchment, Ne Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Water*, 11(7), 1329.
- [45] Demir, H., M., A., B., G., Y., C. 2007. Bafra Ovası Yeraltı Suyu Kalitesinin Sulama Açısından Değerlendirilmesi. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 4(2), 219-226.
- [46] Aksever, F., Büyükşahin, S. 2015. Işıklı Gölü'nü (Çivril/Denizli) Besleyen Su Kaynaklarının Hidrojeokimyasal Özellikleri. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(2), 55-64.
- [47] Gülocak, H., Kıymaz, S. Determination of Usability of Wastewater for Irrigation Purposes in Agriculture in Kırklareli Region.
- [48] Ağca, N., Doğan, K. 2021. Amik Ovasındaki Yüzey Su Kaynaklarının Kalitesi Ve Sulama Ve İçme Amaçlı Uygunluğunun Değerlendirilmesi. *Mustafa Kemal Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 26(3), 770-778.

Yerinde Yapısal Denetime Alternatif Olarak Dijital İkiz Kullanarak Otomatik Çatlak Tespiti ve WEB Tabanlı Sanal Gerçeklik ile Görselleştirme

Abdurahman Yasin Yiğit^{*1}, Murat Uysal^{2,3},

^{*1}Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Harita Mühendisliği, MERSİN

²Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Harita Mühendisliği, AFYONKARAHİSAR

²Afyon Kocatepe Üniversitesi Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Uygulama ve Araştırma Merkezi, AFYONKARAHİSAR

(Alınış / Received: 07.05.2024, Kabul / Accepted: 10.07.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.08.2024)

Anahtar Kelimeler

Yapısal Denetim,
Çatlak Tespiti,
SfM,
Dijital İkiz,
Sanal Gerçeklik

Öz: Yerinde denetimin ve analizinin zor olduğu nesne ve yapıları 3B bir ortamda görselleştirmek yapısal denetimlere farklı bakış açıları kazandırmaktadır. Bu çalışmada, yapısal denetimler için dijital ikiz çerçevesini kullanan yeni bir araştırma konusu önerilmektedir. Bunu uygulanabilir kılmak için ilk önce fotogrametri yöntemi aracılığıyla seçilen test nesnesinin dijital 3B modeli oluşturulmuştur. Üretilen 3B modelden daha sonra Komşuluk Birleştirme ve Eğrilik Tahmini makine öğrenimi ve derin öğrenme dedektörleri algoritmaları ile, 3B model içindeki yüzey farklılıkları analiz edilerek çatlaklar tespit edilmiştir. Ardından 3B model ile tespit edilen çatlaklar birleştirilerek hasarla artırılmış dijital ikiz üretilmiştir. Üretilen hasarla artırılmış dijital ikiz son olarak WEB tabanlı sanal gerçeklik ortamına aktarılarak çeşitli uzmanlara hızlı bir analiz yapma imkânı sağlanmıştır. Bu sayede yerinde denetimlere bir çözüm sunulmasının yanı sıra çeşitli uzman görüşlerine hızlı denetim gerçekleştirilmiştir. Önerilen metodolojiyi modern bir yapı parçasında uygulanmış ve doğruluk analizinde 3B modelin geometrik doğruluğunun yanı sıra tespit edilen çatlakların doğruluğu da incelenmiştir. Sonuç olarak 0.97 cm'lik bir RMSE ile otomatik çatlak tespit doğruluğu sağlanmıştır.

Automated Crack Detection Using Digital Twin as An Alternative to In-Situ Structural Inspection and Visualization with WEB-Based Virtual Reality

Keywords

Structural Inspection,
Crack Detection,
SfM,
Digital Twin,
Virtual Reality

Abstract: Visualising objects and structures in a 3D environment, which are difficult to inspect and analyse in situ, brings different perspectives to structural inspections. In this paper, a new research topic using the digital twin framework for structural inspections is proposed. In order to make it feasible, a digital 3D model of the selected test object is first created through photogrammetry method. From the generated 3D model, cracks are then detected by analysing the surface differences within the 3D model with Neighborhood Aggregation and Curvature Estimation machine learning and deep learning detectors algorithms. Then, the cracks detected with the 3D model were merged and a damage-augmented digital twin was produced. Finally, the produced damage-augmented digital twin was transferred to the WEB-based virtual reality environment and various experts were provided with the opportunity to make a quick analysis. In this way, in addition to providing a solution for on-site inspections, rapid inspection was carried out for various expert opinions. The proposed methodology was applied to a modern building part and the accuracy of the detected cracks as well as the geometric accuracy of the 3D model was examined in the accuracy analysis. As a result, automatic crack detection accuracy with an RMSE of 0.97 cm was achieved.

*İlgili Yazar, email: abdurahmanyasinyigit@gmail.com

1. Giriş

Altyapı sistemleri ve yapılar, düzenli olarak veya bir doğal afetin hemen ardından yapısal yönetmeliğe göre sorumlu mühendisler tarafından görsel olarak yerinde denetlenmektedir [1]. Uygun bir uzman değerlendirme süreci, hasarlı yapıların potansiyel arızalarını önlemekte olup insan yaşamı ve ekonomik kayıplar için herhangi bir tehlike oluşturabilecek sonuçları en aza indirmektedir [2]. Bir inceleme sırasında mühendisler, yapısal bileşenlerdeki hasarları görsel olarak yerini belirlemeye çalışır ve ardından bu yapının hizmet vermeye uygun olup olmadığını, ek analiz gerektirip gerektirmediğini, güçlendirme gerektirip gerektirmediğini veya yıkılması gerekip gerekmediğini belirlemeye çalışmaktadır [3]. Özellikle çatlaklar, beton veya duvar gibi kırılabilir yapılarda inceleme sırasında en sık gözlemlenen hasar şeklidir ve bu da çatlakları yapısal denetimde çok önemli hale getirmektedir. Bu yüzden çatlakların sürekli olarak denetlenmesi gerekmekte olup bu süreç uzun yıllardır geleneksel yöntemlerle yapılmaktadır. Fakat geleneksel yapı denetimlerinin başlıca sınırlamaları bulunmaktadır. Özellikle nesnellikten yoksun olması, uzun uygulama süresi, önemli maliyetler ve zararları belgelemenin zorluğu ön plana çıkmaktadır. Bu dezavantajlar çatlak tespitinde yardımcı olacak yeni değerlendirme metodolojilerine olan ihtiyacı giderek artırmaktadır.

Yapıların hızlı bir şekilde denetlenmesine yönelik mevcut prosedürler subjektif, zaman alıcı ve belgelenmesi külfetli olduğundan dolayı süreci otomatikleştirmek ve eksiklikleri ortadan kaldırmak için yeni teknolojiler kullanılmalıdır [4]. Görüntü ve menzil tabanlı veri toplama yöntemleri ve bilgisayar görüşü gibi yapay zekadaki son gelişmeler henüz yapı ve altyapı uygulamalarına bütünleşmiş çalışmaları yoğun olmasa da bunun için gerekli çalışmalar hız kazanmış durumdadır ve olumlu katkılar alınmaktadır [5]. Hasar değerlendirmesinde mevcut en son teknoloji olarak derin öğrenme ve fotogrametri (görüntü tabanlı yöntem) yöntemleri [6] dâhil olmak üzere bilgisayarla görme teknikleri ile görüntü verilerini kullanan Sanal Gerçeklik (SG) destekli dijital ikiz teknolojisi karşımıza çıkmaktadır [2]. Bu teknolojilerin en önemli avantajı geleneksel denetimler sırasında özelliği, maliyeti ve operasyon süresini azaltması gösterilmekte olup sürecin olabildiğince hızlı ve doğru olmasının başında tam ve eksiksiz bir üç boyutlu (3B) model üretmek gelmektedir. 3B modeller dijital ikiz oluşturmanın ilk aşaması olup bu modellerin doğruluğu denetimin doğruluğunu da direkt etkilemektedir. Bu noktada özellikle görüntü tabanlı yöntemlerden olan fotogrametri yöntemi 3B model üretiminde ilk başta gelmektedir [7-9]. Teknolojinin gelişmesi ve fotogrametri yönteminde kullanılan hareket tabanlı yapısal algılama (Structure from motion/SfM) ve çoklu-görüntü stereo (Multi View Stereo/MVS) algoritmaları ile bir nesnenin yüksek kaliteli fotogerçekçi 3B sahneleri yeniden oluşturmak için dokulu kafesler olarak ayrıntılı modeller hızlı bir şekilde üretebilmektedir [10, 11]. Bu algoritmalar ile üretilen modellerin doğruluğu kanıtlanmasına rağmen [12] ortaya çıkan verinin boyutu önemli bir dezavantaj oluşturmaktadır. Bu yüzden üretilen 3B modellerin diğer kullanıcılara aktarımında büyük veri problemi ortaya çıkmaktadır. Modellerin diğer kullanıcılara aktarımında SG kullanılması özellikle yapılar için SG destekli dijital ikizler ile, geometrik bilgilerin yanı sıra hasar koşullarına ve karakterizasyonlarına ilişkin verileri içeren uçtan uca bir çözüm oluşturabilmektedir [13].

Son yıllarda yapılan birçok çalışma, binaların yapısal sağlığını izlemek için dijital ikizleri kullanarak umut verici sonuçlar vermiştir. Örneğin, Barazzetti ve arkadaşları [14], SG uygulamalarında kullanılmak üzere tarihi bina bilgi modellemesi biçiminde dijital ikizler oluşturmak için fotogrametrik bir prosedür tanımladı. Hoskere ve arkadaşları [15], derin öğrenme modelleri tarafından tespit edilen ve fotogrametrik 3B model kullanılarak kusurlara sahip dokulu bir 3B bina modeli içeren yapı modelleri sundular. Yöntemleri, hasar değerlendirme belgeleri için yararlı bir başlangıç noktası olsa da yalnızca tek bir binada test edildi, fakat çalışmada hasar karakterize edilmedi. Jouan ve arkadaşları [16] miras yerlerinin önleyici korumasını desteklemek için tarihi bina bilgi modelleri dijital ikiz olarak kullandılar. Angeliu ve arkadaşları [17], yağma binaların yapısal sisteminin bütünlüğünü incelemek ve önleyici bakım ve olası güçlendirme müdahaleleri dâhil olmak üzere sistem tepkisini spesifik olarak analiz etmek için dijital ikiz kullandı. Ayrıca 2022'deki Zagreb ve Petrinja depremlerinden sonra fotogrametri ve lazer tarama gibi yeni teknolojileri ile doğal afetler ve yapısal bakımdan sonraki hasar değerlendirmeleri için dijital ikizlerin oldukça önemli olduğu Stepinac ve arkadaşları [18] tarafından yapılan çalışma sonucunda ortaya konulmuştur. Çalışmaları, hasar değerlendirmesini iyileştirmek için yeni teknolojilerden toplanan veriler için nesnellik, zaman ve dokümantasyon açısından uygulamanın önemini göstermiştir. Yapısal bakımı izlemek ve tanımlamak için Rainieri ve arkadaşları [19], dijital ikizlerin kullanımını yapı bilgi modellemesi şeklinde sundu. Levine ve arkadaşları [20] insansız hava aracı görüntüleri, bileşen tanımlama ve hasar değerlendirmesi ile deprem sonrası bina değerlendirmesi için bir dijital ikiz çerçevesi önerdi.

Fotogrametri yöntemi ile üretilen dijital ikizler ile SG destekli yapısal analizlerin amacı bir varlığın hizmet ömrü boyunca izlenmesi için otomatik hasar değerlendirmelerine doğru ilerlemektir. Bu metodolojinin bir denetim sırasında toplanan bilgileri daha verimli bir şekilde belgeleyeceğine, nesnellığı artıracak ve operasyon süresini kısaltacağı bilinmektedir [17]. Fotogrametri yöntemi ile üretilen 3B model ile otomatik tespit edilen hasarların entegrasyonundan oluşan hasarla artırılmış dijital ikizler, sayısal yöntemler kullanılarak mekanik analiz gibi daha derinlemesine hasar değerlendirme faaliyetleri için yararlı olabilmektedir. Bu amaç doğrultusunda çatlakları olan

bir yapı varlığının 3B yeniden yapılandırılmış geometrisini ve bunların karakterizasyonunun entegrasyonun getirdiği avantajların SG ile desteklenmesinin yerinde yapı denetimlerine alternatif olması büyük avantajlar sağlamaktadır. Mevcut hasar değerlendirme yöntemleri bu alanlardaki teknikleri kullansa da hasarı tespit etmek veya belirli bir varlık için bir dijital ikiz oluşturmak gibi bazı manuel müdahaleler de gerektirebilecek belirli görevlerle sınırlıdır. Bunun için, 3B bina modelleri oluşturmak ve çatlakları görüntülerden anlamsal olarak bölümlere ayırmak ve karakterize etmek için çok sayıda metodoloji birleştirilmelidir [68]. Örneğin bu çalışmada da 3B model üretimi için kullanılan SfM tabanlı fotogrametri için uygun yapı varlığının çoklu görünüm görüntüleri gerekmektedir. Çalışmamızın temel ayırt edici özelliği, tespit edilen çatlakların iki boyutlu görüntülerin aksine 3B modellerden elde edilmesidir. Bu nedenden dolayı Fotogrametri ile üretilen yüksek kalitedeki fotogerçekçi 3B modeller çalışmanın en önemli aşamasını oluşturmaktadır. Çatlakları 3B model üzerinden tespit etmek için yapay zekâ algoritmaları kullanılmıştır. Bunun için Bentley tarafından geliştirilen makine öğrenimi ve derin öğrenme araçları kullanılmıştır. Bu araçlar ilk olarak Komşuluk Birleştirme ve Eğrilik Tahmini algoritmalarıdır ve bunlar makine öğrenimi ve derin öğrenme algoritmalarını kullanmaktadır. Bu çalışmada, önceden var olan kütüphaneler kullanılmış ve çalışma alanı için en uygun parametreler geliştirilmiştir. Kütüphanedeki ve çalışma alanındaki verilerin uyumluluğu sonuçların doğruluğunu doğrudan etkilemektedir. Makine öğrenimi ve derin öğrenme algoritmaları, 3B model içindeki yüzey farklılıklarını analiz ederek çatlakları tespit edebilmektedir. Kullanılan dedektörler aslında bir nesne algılama aracıdır. Özüde, algoritma üretilen dijital ürünler temelinde çalışır [49-52,68]. İlk olarak 3B modeli bir dizi nokta bulutu olarak temsil ederek operasyonel sürecini başlatır. Daha sonra, yüzey farklılıklarını belirlemek için nokta bulutu analize tabi tutulur. Son olarak, yüzeylerdeki farklılıklar nedeniyle çatlakların varlığı tespit edilir. Klasik fotogrametrik modellerde 3B nesne tespiti için kullanılan özellikler arasında çatlak olarak kabul edilecek yüzey farklılıklarının minimum değeri, çatlakların yönü ve minimum uzunluğu, çatlakların minimum genişliği ve yüzey farklılıklarının yumuşatma değeri belirlenir ve çatlaklar tespit edilir.

Tespit edilen çatlaklar ile fotogrametrik 3B model bilgisinin birleştirilmesi ile hasarla artırılmış dijital ikiz çıktısı üretilmiştir. Bu dijital ikiz birden fazla metodolojinin entegrasyonu ile oluşturulmaktadır. Hasarla artırılmış dijital ikizler aslında fotogrametri yöntemi ile üretilen 3B model ile tespit edilen çatlak bilgilerin bütünleştirildiği (3Bmodel+çatlak) ve yapının geometrik bilgilerin birleştirildiği yeni bir modeldir. Bu model mühendislik çalışmaları için mevcut yapı yönetimi uygulamalarında yapı ömrünün denetlenmesi, analizlerinin yapılması ve daha verimli ve etkili bir görsel sunum için SG entegreli WEB tabanlı platformlarda kullanılabilir. Dijital ikizlerin SG ortamında sunulması, yapı yönetimindeki uzman görüşlerin arttırılmasına olanak sağlayacaktır. Bu sayede diğer mühendislik çalışmalarında daha fazla mühendis ve uzmanla yapılan görüşmeler, farklı anlayışlara yol açabilir ve araştırmanın genellenabilirliğini artırabilir. Ayrıca, kullanıcıların yapı denetimi eylemlerine gerçek zamanlı olarak yanıt veren dinamik içerikle etkileşim kurulması sağlanabilmektedir. Bu sanal ortamda, gerçek dünya koşullarını, olasılık senaryolarını ve akla gelebilecek her türlü durumu etkin bir şekilde simüle edebilir ve sonuçlar anlık olarak değerlendirilebilir [21-23]. Yerinde denetimlere alternatif olan hasarla artırılmış dijital ikiz ile en güncel ve gerçekçi bir model ile etkileşim kurma yeteneği, insanların tasarım, operasyon ve bakım kararlarını alma şeklini değiştirmektedir. Karmaşık işlemleri gerçek zamanlı 3B olarak görselleştirme ve simüle etme gücü, insanların varlıklarıyla etkileşim kurma biçimini yükselterek gezegendeki her fiziksel alan ve varlığın yaratılma, inşa edilme ve işletilme şeklini dönüştürmektedir.

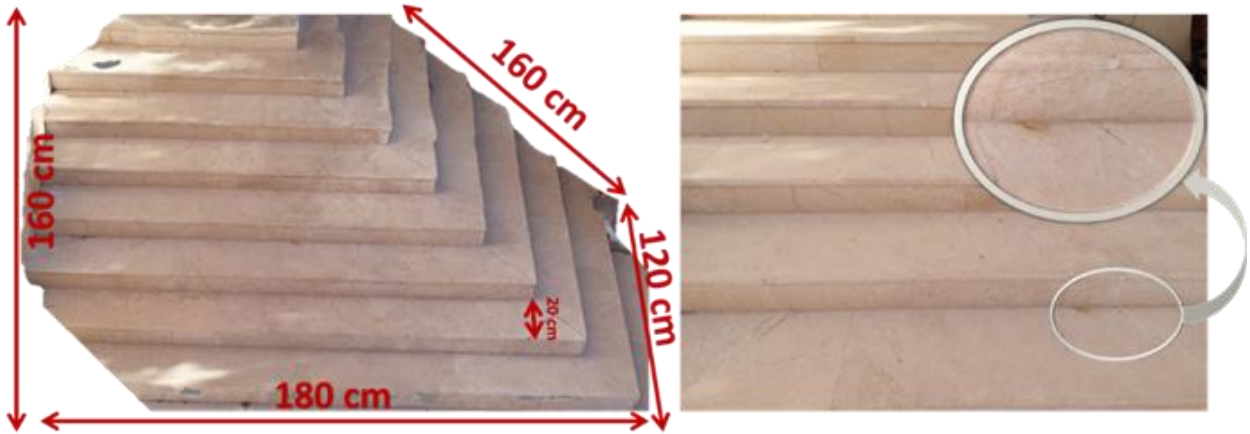
Bu çalışma dijital ikiz ve SG entegrasyonu ile işlevsel bir tasarım geliştirerek yapı yönetimindeki mühendislik çalışmalarının mevcut uygulamalarına nasıl katkıda bulunabileceğini araştırmaktır. Dijital ikizlerin mevcut uygulamalarda kullanılmasında çeşitli zorluklar bulunmaktadır. Dijital ikizleri mevcut uygulamada uygulamak için önce bir 3B veri modeli geliştirmek gerekir. Ancak, bir 3B veri modeli geliştirmek teknik olarak karmaşık ve finansal olarak pahalıdır. Mühendislik çalışmaları için mevcut yapı yönetimi uygulamalarında dijital ikizlerin uygulanmasının, yapı durumunun denetlenmesi, analizlerinin yapılması ve daha verimli ve etkili bir görsel sunum için SG entegreli kullanımının uygulanması önemli bir aşama olacaktır. Sonuç olarak gerçek dünyanın tam ve eksiksiz bir modeli doğru ve hızlı bir veri toplama süreci ile bunun temsili olan dijital ikiz kavramında geçmektedir. Çalışma kapsamında otomatik bir yapısal denetim simüle etmek için birçok çatlak barındıran test nesnesi seçilmiştir. Test nesnesine ait ilk olarak fotogrametri yöntemi ile 3B model elde edilmiş ardından otomatik bir şekilde çatlaklar tespit edilmiştir. Daha sonra tespit edilen çatlaklar ile 3B model entegre edilerek hasarla artırılmış dijital ikiz üretilmiştir. Üretilen bu dijital ikiz WEB tabanlı SG gibi görselleştirme araçları ile kullanıcılara aktarılması ile analiz ve temsile önemli katkılar sunulmuştur. Sonuç olarak elde edilen yapısal 3B modellerin denetim ve analizleri yapılarak çeşitli görselleştirme araçları ile aktarılıp farklı kullanıcılara sunulmuştur. Çalışma sonunda elde edilen bulgular, gelecekteki dijital ikiz çalışmalarında en iyi temsil senaryolarının gelişmesine, 3B modeller üzerinden denetim ve analizlerin yapılmasına ve çeşitli platformlarda sunumuna katkı sağlayacaktır. Ayrıca çalışmada elde edilen bulgular daha büyük bir yapısal denetim çalışmalarına altlık olacaktır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Test Nesnesi ve Materyal

Çalışmamızın uygulama kısmı iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama yöntemimizi test ettiğimiz yakın resim fotogrametri ile 3B model üretmeyi kapsamaktadır. İkinci aşama ise 3B model kullanılarak otomatik çatlak tespitini oluşturmaktadır. Testimizde modern bir binanın giriş kısmındaki merdiven yapısında meydana gelen çatlaklar önerilen yöntemle otomatik olarak tespit edilmektedir. Bu test sonucunda merdivenin fotogrametrik 3B modeli üretilmiş ve çatlaklar otomatik olarak tespit edilerek hasarla artırılmış dijital ikiz üretilmiştir. Seçilen merdiven yapısı 200x160x100 cm boyutlarındadır (Şekil 1). Test nesnesinin basit formu ve modern yapı malzemelerinden oluşması çalışmamız için seçilmesinde etken olmuştur. Test nesnesindeki çatlaklar (Şekil 1 sağ) onu amaçlanan test yöntemi için ideal hale getirmektedir.

Testte, 14,2 Megapiksel DX-format sensörlü (piksel boyutu 5,26 μm) ve odak uzaklığı 35 mm Nikkor lens ile donatılmış bir Nikon D3100 dijital kamera kullanılarak 35 görüntü toplanmıştır. Test nesnesi olarak seçilen merdiven, yapının dış bağlantısını oluşturduğu için bulut etkisinden kaçınmak amacıyla bulut örtüsünün %15'in altında olduğu sabah 11 ile 12 arasında görüntüler toplanmıştır. Fakat seçilen test alanının etrafındaki nesnelere dolayı tam olarak gölgelerden kaçınılamamıştır. Görüntü alma mesafesi yaklaşık 500 mm olarak ayarlanmış olup kabaca 1:15'lik bir görüntü ölçeği ve yaklaşık 0,07 mm'lik bir yer örnekleme aralığı (YÖA) ile elde edilmiştir. Önerilen yaklaşımda tespit edilen çatlakların hassasiyeti, kullanılan görüntü verilerinin kalitesiyle doğrudan bağlantılıdır. Uygulanan yöntem piksel başına 1 cm görüntü çözünürlüğü için maksimum YÖA değeri önerdiğinden dolayı testimizde ve uygulamanın yapıldığı nesnenin görüntü verisi alımında bundan daha iyi YÖA değerleri için veri toplanılmasına özen gösterilmiştir.



Şekil 1. Test nesnesi genel görünümü ve ayrıntılı bir kısım

Yakın resim fotogrametride anlık konumlandırma sistemleri kullanılmadığı durumlarda 3B modeller birim veya ölçek olmaksızın yerel/lokal koordinatlarda üretilmektedir. Bu nedenle 3B modeli ölçeklendirmek ve metrik referans koordinatlarına dönüştürmek için çalışma alanlarında kontrol noktalarına/hedef ölçümlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Fakat bu çalışmada seçilen test nesnesi için çalışma ortamının dar olması alana hedef işaretlerini yerleştirilememesine sebep olmuştur. Bu yüzden alanda doğal hedef işaretlerinden yararlanılmış ve köşe birleşim noktalarından 21 tane doğal hedef işareti seçilmiştir. Bunlardan on üç tanesi fotogrametrik hizalama için kontrol noktası olarak kalan diğer sekiz tanesi ise model doğruluğu için denetleme noktası olarak kullanılmıştır. Çalışmada hedef ölçümü için Topcon ES-60 total-station kullanılmıştır. Dar çalışma alanları ve kısa mesafeler nedeniyle ölçüm boyunca reflektörsüz mod kullanılmıştır. Test alanlarında cihaz ile hedef işaretleri arasındaki maksimum mesafe 5 metreden az olduğundan koordinatlar 3,01 mm (3mm+2 ppm) hassasiyetle ölçülmüş ve bu da cihaz seçimini etkilemiştir. Fotogrametrik veriler toplandıktan sonra uzman mühendis gözetiminde test alanında manuel (Çatlak genişlik ölçer ve uzunluk ölçüm cihazı) bir şekilde seçilen bazı çatlaklarının ölçümü gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler doğruluk analizi için klasik yöntemden elde edilen çatlak ile önerilen yöntemden tespit edilen ölçümlerin karşılaştırılması amacıyla kullanılmıştır.

2.2. Fotogrametri Yöntemi ile 3B Model Üretme

Fotogrametri, somut varlıkların ve komşu çevrelerinin nitelikleri hakkında güvenilir bilgiler elde etmek için görsel temsilleri ve elektromanyetik dalgaların yayılımını kaydeden, araştıran, ölçen ve analiz eden bir disiplindir [24-26]. Bu teknik, doğal çevrenin mekânsal özelliklerinin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını kolaylaştırır ve yüzeyde

zaman içinde meydana gelen kademeli değişikliklerin tespit edilmesine yardımcı olmaktadır [27-29]. Fotogrametri yöntemi ile, 2B görüntülerden 3B bir model oluşturarak nesnelerin dijital 3B dokümantasyonu sağlanabilmektedir [30, 31]. Fotogrametri yöntemi ile özellikle sınırlı veya karmaşık ve erişimi kolay olmayan yapıların incelenmesini, 3B modellerinin oluşturulmasını kolaylaştıran dijital belgelendirme için etkili bir yöntemdir [13, 21].

Fotogrametride bir nesnenin yüzeyindeki noktaların 3B koordinatları, üst üste binen görüntülerin kamera konumlarından ve dış yöneltme parametrelerinden elde edilir. Dış yöneltme parametreleri, örtüşen görüntülerdeki en az üç kontrol noktası kullanılarak hesaplanabilmektedir. Bu yöntem için genellikle, iç yöneltme parametreleri ve kamera kalibrasyon değerleri hakkında önceden bilgi sahibi olmak gerekmektedir. Fakat, SfM gibi gelişmiş algoritmalar uygulanarak kalibrasyon ihtiyacı ortadan kalkmıştır [6, 33]. SfM, geleneksel kameralarla çekilen görüntülerden 3B modellerin oluşturulmasını ve yüzeylerin yeniden yapılandırılmasını önemli ölçüde basitleştirmiştir [34, 35]. SfM, bir sahnenin geometrisini, kamera konumlarını ve odağını tespit etmeyi amaçlayan bir algoritmadır [31, 36]. Bilgisayar görselleştirmesine dayalı bir nesne ölçüm yöntemi olan SfM, dijital kameraların, video kameraların ve kamera donanımlı akıllı telefonların yaygınlığı ve kullanımı nedeniyle büyük ilgi görmüştür [37, 38]. SfM, maliyet etkinliği, hızlı sonuçları ve yerbilimi araştırmalarında basit 3B ölçümleri kolaylaştırma kabiliyeti nedeniyle bilimsel araştırmalarda giderek daha popüler hale gelmiştir [39]. SfM, stereoskopik fotogrametride kullanılanlara benzer fikirlere dayanmaktadır. Stereoskopik fotogrametrimin aksine, SfM için mükemmel bir kamera kurulumuna gerek yoktur [40]. SfM algoritma temelli yazılımlar, çok sayıda görüntülerden ortak noktaları otomatik olarak çıkararak ve seyrek bir nokta bulutu oluşturan yöntemler üzerine kuruludur [40]. Radyometrik piksel değerlerini kullanan SIFT algoritması ise bu işlem için birincil algoritma olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [41]. SfM sürecinde ilk olarak üretilen seyrek nokta bulutunda sonra ek bir aşama olarak yoğun nokta bulutu oluşturulur. Bu aşamada yoğun çoklu-görüntü stereo algoritması uygulanmaktadır [42]. Burada, haritalanan pikseller ve bunlara karşılık gelen 3B koordinatlar nokta bulutlarına dönüştürülür. Daha sonra, bu nokta bulutları bir ağ modeli oluşturmak için kullanılır. Son olarak görüntülerden gerçek dokular kaplanarak 3B model elde edilmektedir. SfM için daha kapsamlı bir inceleme için Michele ve arkadaşlarının [43] çalışmasına bakılabilir.

Dijital ikiz oluşturmak için fotogerçekçi 3B modellerin oluşturulması Context Capture yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Süreç, iki görüntünün 3B yapısının ve kamera pozlarının ilk tahminiyle başlamaktadır. Daha sonra, kamera konumları eklenir veya hesaplanır ve yeni 3B yapıyı oluşturmak için yeni sahne bileşenleri gözlemlenir. Bu aşamada bindirmeli olarak girdi olarak verilen görüntüler sürekli incelenirken blok dengeleme gerçekleştirilir. SfM, tutarsızlıkları ortadan kaldırmak ve kamera konumlarını veya oluşumlarını ardışık görüntülerden değerlendirmek için geleneksel bir prosedür izler [43]. SfM algoritmasının işlevselliği kameranın kendi kendine kalibrasyonu ile geliştirilse de tatmin edici sonuçlar elde etmek için yine de ön kalibrasyon bazen gerekli olmaktadır. Context Capture yazılımında bu çalışma için kameraların iç yöneltme parametrelerini otomatik olarak tahmin edilmiştir. Ardından, kameraların mutlak yöneltmelerin yanı sıra verilen görüntülerin kamera konumu tahmin edilerek ikili görelî pozlar belirlenmiştir [43, 44]. Üçgenleme işlemi ile daha sonra iki veya daha fazla görüntü üzerinden izlenen bir görüntü koordinatının 3B konumunu hesaplanmıştır [44-46]. İlk tahminin ardından, tüm kamera parametreleri sabit tutulurken bağlantı noktalarının izi blok dengeleme yoluyla ayarlanmıştır. Yoğun nokta bulutları oluşturma sürecinde, birbirine eşlenmesi gereken pikseller ve bunların sanal 3B konumları tahmin edilerek katı modeller ve nokta bulutları oluşturulur [47, 48]. Son aşamada ise sanal uzayda oluşturulan modele gerçekçi ve doğal bir yüzey kazandırmak için görüntü kullanılarak foto-gerçekçi bir 3B model elde edilir.

2.3. Otomatik Çatlak Tespiti ve Hasarla Artırılmış Dijital İkiz Üretimi

Bu çalışmada kısmi otomasyon amacıyla yapılardaki hasar incelemesi görevlerini ayrı ayrı ele almak yerine bir yöntemin belirli bir detay seviyesinde dijital ikiz biçiminde hasar bilgilerini içeren eksiksiz bir 3B model oluşturduğu bir vizyon önerilmektedir. Bu amaçla geometrik bilgileri barındıran bir dijital ikiz ile yapının fiziksel bir parçasının geometrisi hakkında derinlemesine veri içeren 3B modelleri girdi ürün olarak kullanılmaktadır. Geometrik bilgileri barındıran dijital ikizleri (fotogrametrik 3B model) görüntülerden elde edilen hasar verileriyle birleştirilerek hasarla güçlendirilmiş/artırılmış dijital ikizler üretilmesi amaçlanmaktadır. İlk adım fotogrametrik yöntem ile yapının detaylı geometrik bilgilerini barındıran yüksek kalitede gerçek dokusu ile kaplanmış 3B dijital ikizini üretmektir. Ardından görüntülerden tespit edilen çatlakların 3B konumlarının hesaplanmasını, zamandan ve maliyetten tasarruf etmek için otomatik olarak vektörleştirilmesini içermektedir. Bu temsilen kapsamlı bilgileri gelecekteki eylemlerin ve kararların hazırlanmasına yardımcı olacaktır. Amaçlanan hasarla artırılmış dijital ikiz çıktısı, detay seviyesi modeli tarafından sağlanan geometrik bilgileri haritalanmış ve karakterize edilmiş hasarlar ile birleştirilebilir ve analizler edilebilir. Bu sayede yerinde denetimlere alternatif bir yöntem geliştirilmektedir. Çalışmamızda 3B uzaydaki görüntülerden çatlakları otomatik olarak tespit edilmesi aşaması Bentley [44, 45] tarafından geliştirilen makine öğrenimi ve derin öğrenme algoritmaları kullanılarak yapılmaktadır.

İlk olarak, yukarıda açıklanan SfM tabanlı fotogrametri yöntemi kullanılarak görüntülerden 3B model ve nokta bulutu oluşturulmuştur. Context Capture yazılımında üretilen 3B model çatlak tespit etmek için kullanılmıştır. Çalışmamızı diğer çalışmalardan ayıran en büyük özellik, tespit edilen çatlakların 2B fotoğraflardan değil 3B modellerden elde edilmesidir. Bunun için yapay zekâ algoritmaları kullanılmıştır. Temel algoritmaları çalıştırmak için yukarıda da açıklandığı gibi Bentley firması tarafından geliştirilen makine öğrenimi ve derin öğrenme dedektörleri kullanıldı. Burada hazır olan kütüphaneler kullanılmış olup çalışma alanına en uygun parametreler tasarlanmıştır. Kullanılan kütüphanedeki veriler ile çalışma alanının uyumu doğruluğu direkt etkileyecektir. Bu araçlar, 3B modeldeki yüzey farklılıklarını analiz ederek çatlakları tespit eder. Klasik fotogrametrik modellerde 3B nesne tespiti için ID araçları tarafından kullanılan özellikler ve ayarlar aşağıdaki gibidir:

- Eşik (Threshold): Çatlak olarak değerlendirilecek yüzey farklılıklarının minimum değerini ayarlar.
- Açı (Angle): Çatlakların yönünü belirler.
- Uzunluk (Length): Çatlakların minimum uzunluğunu belirler.
- Genişlik (Width): Çatlakların minimum genişliğini belirler.
- Yumuşatma (Smoothing): Yüzey farklılıklarını yumuşatmak için kullanılan bir ayardır [49-51].

Yapay zekâ algoritmaları 3B modeldeki yüzey farklılıklarını analiz ederek çatlakları tespit etmektedir. Genel olarak algoritma üretilen dijital ürünleri baz alarak çalışır. Algoritmanın temel girdisi olan 3B model bir dizi nokta bulutu olarak temsil edilir. Daha sonra modelin yüzey farklılıklarını belirlemek için nokta bulutu analiz edilmektedir. Analiz edilen yüzeylerdeki farklılıklar nedeniyle çatlaklar tespit edilir. Klasik fotogrametrik modellerde 3B nesne tespiti için kullanılan özellikler sırasıyla; Çatlak olarak değerlendirilecek yüzey farklılıklarının minimum değeri, çatlakların yönü ve minimum uzunluğu, çatlakların minimum genişliği ve yüzey farklılıklarını yumuşatma değeri ayarlanmalıdır [49-51]. Bu araçlar ilk olarak Komşuluk Birleştirme ve Eğrilik Tahmini algoritmaları kullanmakta ve bunlar makine öğrenimi ve derin öğrenme algoritmalarını kullanmaktadır [51, 68]. Bu algoritmalar 3B bir yüzeydeki varyasyonları analiz etmek için önceden var olan modelleri kullanır. Çatlakları tespit etmek için kullanılan algoritma yapay zekâ algoritmaları üzerine kurulmuştur. Bu mekanizma, eğrilik değeri ile önceden belirlenmiş bir eşik değeri arasındaki karşılaştırmaları yürütür. Bu prosedür, insan beyninin çatlakları nasıl algıladığına benzer [52]. Komşuluk Birleştirme algoritması, 3B modeldeki yüzey farklılıklarını temsil etmek için önceden eğitilmiş bir model kullanarak nokta bulutundaki her noktanın komşu noktalarını tanımlar ve Denklem (1)'i kullanır [52, 53, 68].

$$n(p) = \{q \in P \mid \|p - q\| < r\} \quad (1)$$

Burada

$n(p)$: bir noktanın p çevresinde belirli bir yarıçap r içinde kalan tüm noktaların kümesini temsil eder (p : nokta kümesi).

q : p noktasının komşusu

P : Nokta bulutu

r : Komşuluk mesafesi

Nokta eğriliklerini hesaplamak için Eğrilik Tahmini algoritması kullanılır. Bu algoritma, nokta bulutunun eğriliğine nasıl yaklaşılacağını öğrenen önceden var olan bir modeli kullanır ve bu algoritma, noktaların eğriliğini hesaplamak için Denklem (2)'yi kullanır.

$$K(p) = \frac{k_1(p) + k_2(p)}{2} \quad (2)$$

Burada

$K(p)$: p noktasının eğriliği

$k_1(p)$: p noktasının birincil eğriliği

$k_2(p)$: p noktasının ikincil eğriliği

Çatlak tespit algoritması, belirli bir değeri aşan eğimlere sahip noktaları tanımlar [53, 54]. Algoritma tespit edilen çatlakların boyutu, derinliği ve konumu hakkında bilgi sağlamaktadır. Eğriliği belirli bir değerden daha yüksek olan noktaları, çatlak olarak tespit etmek için Denklem (3)'ü kullanır.

$$c(p) = 1 \text{ if } |K(p)| > t \text{ else } 0 \quad (2)$$

Burada

$c(p)$: p noktasının çatlak olup olmadığı
 $|K(p)|$: p noktasının eğriliğinin mutlak değeri
 t : Eşik değeri

Yukarıda verilen formüller, çatlak tespit araçlarının/dedektörlerinin matematiksel modelinin temelini oluşturur. Bu formüller, 3B modeldeki yüzey farklılıklarını analiz etmek ve çatlakları tespit etmek için kullanılır. Sonuç olarak bu algoritmalar ile 2B görüntülerden ziyade 3B model üzerinde konumlandırılmış görüntülerden bir bütün olarak otomatik çatlak tespiti gerçekleştirilmektedir. Elde edilen 3B model ve tespit edilen çatlaklar birleştirilerek (3B model + çatlak) farklı detay seviyesinde hasarla artırılmış dijital ikizler üretilebilmektedir. Dijital ikiz çıktımızın amacı, 3B modelden alınan geometrik verileri tanımlanmış ve ölçülmüş hasarla entegre etmektir.

2.4. Doğruluk Analizi

Çalışmada iki doğruluk analizi yapılmıştır. İlk analizde fotogrametri ile oluşturulan 3B modelin konumsal ve geometrik hassasiyeti incelenmiştir. Bu analiz, modelin koordinatlarının kontrol noktalarına göre doğruluğunun değerlendirilmesini kapsamaktadır. Referans verileri 3B modelin koordinatlarıyla karşılaştırılır ve herhangi bir tutarsızlık hata olarak hesaplanır. Referans ölçümleri olarak total-station ile ölçülen doğal hedef işaretleri kullanılmış olup analizler Denklem (4) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Test çalışması için toplam 21 hedef işaretinden 8'i doğruluk analizi için kullanılmıştır. Referans veri ile dijital ikiz modelinden elde edilen veri arasındaki fark, model konumunun referans noktasından ne kadar uzakta olduğunu göstermektedir. Bu hatayı ölçmek için Karesel Ortalama Hata (Root Mean Squared Error/RMSE) hesaplanmış ve modelin doğruluğu ortaya konulmuştur. Modelin doğruluğu hata değerinin azalmasıyla orantılıdır. İkinci analiz olarak yüzeyde otomatik tespit yoluyla bulunan çatlakların güvenilirliğini değerlendirmek için doğruluk incelemesi yapılmıştır. Yüzeyden yapılan manuel ölçümler, otomatik tespitten elde edilen vektör verileriyle eşleşmiştir. Test nesnesindeki çatlaklara ilişkin referans veri toplama işlemi ölçüm araçları kullanılarak bir uzman tarafından manuel olarak gerçekleştirilmiştir. Analiz için Denklem (4) kullanılmış ve bir RMSE değeri hesaplanmıştır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(x - y)^2}{n}} \quad (4)$$

Burada

x: kontrol noktasının koordinatları/Manuel çatlak uzunlukları

y: 3B model üzerinden alınan koordinatlar/Otomatik çatlak uzunlukları

n: Kontrol noktası-hedef sayısı/Çatlak sayısını temsil etmektedir.

2.5. WEB Tabanlı Sanal Gerçeklik

Fotogrametri yöntemi ile elde edilen 3B modellerden dijital ikizlerin oluşturulması ve bu dijital ikizlerin WEB tabanlı SG platformlarına aktararak görselleştirilmesi giderek popüleritesi artan bir konudur [55,56]. WEB tabanlı sanal gerçeklik platformları, bir cihaz (genellikle bir gözlük) aracılığıyla gerçek dünyayı veya fiziksel nesnelere dijital içeriklerle zenginleştirmelerine olanak tanımaktadır [57]. Fotogrametri ile elde edilen 3B dijital ikiz modellerinin WEB tabanlı SG platformlarına entegrasyonu genellikle belirli bir platformun yazılım geliştirme araçları ve API'leri kullanılarak gerçekleştirilir. Dijital ikizin bu platforma aktarılması kullanıcıların gerçek dünya ile etkileşimde bulunmalarını sağlar. Bu tür bir teknoloji birçok farklı kullanım senaryosuna sahiptir [58, 59]. Örneğin; eğitimde, sanal turizmde, ürün tanıtımında, endüstriyel tasarımda, mühendislik analizinde ve daha birçok alanda kullanılabilir. Kullanıcılar, gerçek dünya nesnelere üzerine bilgi eklemek veya dijital nesnelere etkileşimli bir şekilde incelemek için bu teknolojiyi kullanabilirler [60]. Sonuç olarak, fotogrametri ile elde edilen 3B dijital ikizlerinin WEB tabanlı Sanal gerçeklik platformlarına aktarılması hem eğlence hem de iş uygulamaları için büyük potansiyele sahiptir. Fotogrametri ile oluşturulan 3B dijital ikizlerin WEB tabanlı SG entegrasyonu için dikkat edilmesi gereken hususlar bulunmaktadır [61]. Fotogrametri ile elde edilen 3B modeller genellikle büyük ve karmaşık olabilmektedir [62]. Bu modellerin WEB tabanlı SG platformlarında etkili bir şekilde kullanılabilmesi için model optimizasyonunun yapılması gereklidir. Özellikle model boyutunu azaltmak, çoklu cihazlarda hızlı yükleme ve görüntüleme sağlamak için önemli olmaktadır. Ayrıca SG platformları, belirli 3B model formatlarını desteklemektedir. Bu nedenle, fotogrametri yöntemi ile elde edilen 3B modellerin uygun formatlarda dönüştürülmesi gerekli olabilmektedir. Örneğin, OBJ, FBX, STL veya USDZ gibi yaygın 3B dosya formatları sıkça kullanılır [63]. Diğer bir husus ise gerçek dünya ya da fiziksel nesneyi temsil etmesi istenilen dijital ikizin konum bilgisine sahip olmamasıdır. Özellikle WEB tabanlı SG platformlarında, kullanıcıların cihazlarını gerçek dünyada doğru bir şekilde konumlandırabilmek ve takip edebilmek için özel algoritmalar ve teknolojiler kullanılır. Fotogrametri yönteminde gerçek koordinatlar ya da yerel referanslandırma yapılabilme özelliğinden dolayı 3B modeller doğru konum bilgisi ile üretilmektedir. Bu avantajdan dolayı fotogrametri ile üretilen dijital ikizler

doğru bir şekilde gerçek dünyaya yerleştirilmesi gerçekleştirilirken elde edilen modelin doğru ölçek ve konumda temsil edilmesi sağlanmış olunur. Fotogrametri yöntemi ile üretilen 3B modellerin ve dijital ikizlerin WEB tabanlı SG ile depolanması, görüntülenmesi ve paylaşılması için birçok popüler platform bulunmaktadır ve bu platformlar WEB tabanlı SG projeleri için büyük bir öneme sahiptir. Bu amaçla kullanılan popüler platformlar; başta Sketchfab, Unity3D, Unreal Engine, Google Poly, Mozilla Hubs, Amazon Sumerian olarak gösterilebilmektedir [64]. Bu platformların, avantajları ve dezavantajları vardır. Özellikle bu platformlar, 3B içeriklere kolayca erişim sağlar ve kullanıcıların tarayıcıları üzerinden görüntülemelerine olanak tanır. Bu, içerikleri geniş bir izleyici kitlesiyle paylaşmayı kolaylaştırırken genellikle kullanıcı dostu arayüzler sunarlar ve içeriklerin yüklenmesi, görüntülenmesi ve paylaşılması basit bir süreç haline gelir. Birçok platform yaygın kullanılan SG cihazları ile uyumlu olup bu, kullanıcıların 3B içeriklere farklı cihazlar üzerinden erişmelerini ve SG deneyimleri yaşamalarını sağlamaktadır [65].

Tablo 1. WEB Tabanlı Sanal Gerçeklik Platformları (Ücretsiz/Ek Ücretli Platformlar).

Adı	Avantaj	Dezavantajı	Ücretsiz ve Ücretli Planlar /lisans durumu
Sketchfab	Kodlama bilgisi olmadan, 3B modelleri yüklemek ve paylaşmak için kolay bir arayüze sahiptir. Kurulum gerektirmez tarayıcı üzerinden çalışır. Çok sayıda eğitim ve rehber sunar. Hem artırılmış gerçeklik hem de sanal gerçeklik deneyimlerini destekler. Bilgisayar, mobil cihazlar ve sanal gerçeklik gözlükleri dahil çeşitli cihazlarla uyumludur. Kullanıcıların modellerle etkileşime geçmesine olanak tanır (dönme, yakınlaştırma, bilgi noktaları ekleme). Modellere animasyonlar, sesler ve bağlantılar gibi etkileşimli özellikler eklenebilir.	Çok karmaşık veya büyük dosya boyutlarına sahip modellerde performans sorunları yaşanabilir. Tarayıcı tabanlı olmasından dolayı bazı performans ve grafik kısıtlamaları olabilir. Bazı kullanıcılar için özelleştirme seçenekleri yetersiz olabilir. Özellikle belirli bir iş akışı veya kullanıcı deneyimi gereksinimi varsa, platformun sunduğu seçenekler sınırlı kalabilir. 3B modellerin çevrimiçi paylaşılması, ticari sınırlar veya telif hakları açısından güvenlik riskleri oluşturabilir.	Ücretsiz plan bazı kısıtlamalar getirir, özellikle model boyutuna, depolama alanına sınırlamalar bulunur. İleri seviye özellikler ve daha fazla depolama için ücretli planlara ihtiyaç duyulabilir.
Unity3D	WEB tarayıcıları, mobil cihazlar, sanal gerçeklik kulaklıklar ve konsollar dahil olmak üzere çeşitli platformlarda görüntülenebilir ve etkileşime girebilir. WEB tabanlı deneyimleri WebXR API'si üzerinden destekler. C# programlama dili ile geliştirilmeyi destekler. Görüntü tanıma, anlık takip ve stereo ses gibi gelişmiş özelliklerine sahiptir. Kullanıcıların 3B modellerle gerçek zamanlı olarak etkileşime girmesine olanak tanıyan etkileşimli deneyimler oluşturmak için kullanılabilir. Gelişmiş grafik motoru sayesinde yüksek kaliteli görseller ve performans sağlar. Büyük dosya projeleri yapılabilir. Unity, ekipler için iş birliği yapmayı kolaylaştıran entegre versiyon kontrol sistemleri sunar.	Karmaşık bir platformdur, başlangıç seviyesindeki kullanıcılar için öğrenmesi zor olabilir. Kodlama bilgisi gereklidir. Özellikle gelişmiş projeler için yüksek derecede teknik bilgi gerektirir. Büyük ve karmaşık modeller, bazı platformlarda performans sorunlarına neden olabilir. Unity projeleri genellikle büyük dosya boyutlarına sahip olabilir, bu da yükleme sürelerini uzatabilir.	Bazı gelişmiş özellikleri ücretlidir. Ek eklentiler ve araçlar için ekstra maliyetler ortaya çıkabilir.
Unreal Engine	Fotogerçekçi grafikler ve karmaşık sistemler oluşturmak için kullanılabilir. WEB tarayıcıları, mobil cihazlar, sanal gerçeklik kulaklıklar ve konsollar dahil olmak üzere çeşitli platformlarda görüntülenebilir ve etkileşime girebilir. C++ programlama dili ve görsel programlama aracı Blueprints ile geliştirilmeyi destekler. Görüntü tanıma, anlık takip ve stereo ses gibi gelişmiş özelliklerine sahiptir. Gerçekçi ışıklandırma, gölgeleme ve görsel efektler sunar, bu da çok yüksek kaliteli görseller ve grafikler sağlar. WEB tabanlı deneyimleri WebXR API'si üzerinden destekler. Birden fazla kullanıcının aynı projede eş zamanlı olarak çalışmasına olanak tanır.	Karmaşık bir platformdur, özellikle gelişmiş projeler için yüksek derecede teknik bilgi ve deneyim gerektirir. Kodlama bilgisi gereklidir. Büyük ve karmaşık modeller, bazı platformlarda performans sorunlarına neden olabilir. Yüksek kaliteli görseller ve efektler, güçlü donanım gereksinimleri doğurabilir ve depolama alanı gereksinimlerini artırabilir. Yeni Unreal Engine sürümlerine güncelleme yaparken uyumluluk sorunları yaşanabilir.	Bazı gelişmiş özellikleri ücretlidir, ticari projeler için gelir üzerinden yüzde bazlı lisans ücreti talep edebilir.
A-Frame	HTML benzeri sözdizimi ile kullanıcı dostu ve öğrenmesi kolaydır. Özellikle WEB geliştiricileri için tanıdık bir yapı sunar. Teknik bilgi gereksinimi minimaldir, bu da yeni başlayanlar için idealdir. Kurulum gerektirmez, doğrudan tarayıcı üzerinden çalışır ve herhangi bir ek eklenti gerektirmez. Masaüstü, mobil cihazlar ve sanal gerçeklik cihazları ile uyumludur. Mozilla tarafından geliştirilen ve geniş bir topluluk tarafından desteklenen açık kaynaklı bir projedir. Basit yapısı ve kullanıcı dostu arayüzü sayesinde hızlı prototipleme ve geliştirme imkânı sunar.	Çok karmaşık veya büyük sahneler, performans sorunlarına yol açabilir. İleri düzey grafik ihtiyaçları olan projeler için yeterli esneklik sunmayabilir, sınırlı kalabilir. WebGL tabanlı olduğu için, donanım erişimi nedeniyle potansiyel güvenlik riskleri barındırır. WEB tabanlı olması, potansiyel kötü niyetli kullanıcı ve saldırılara açık olabilir. Farklı tarayıcılar arasında uyumluluk ve performans farklılıkları olabilir. Daha büyük ve karmaşık profesyonel projeler için yeterli olmayabilir.	A-Frame açık kaynak kodlu bir projedir, bu da onu ücretsiz ve herkese açık hale getirir.

Tablo 2. WEB Tabanlı Sanal Gerçeklik Platformları (Ücretli Platformlar).

Adı	Avantaj	Dezavantajı	Ücretsiz ve Ücretli Planlar /Lisans durumu
Mozilla Hubs	Basit ve sezgisel bir arayüze sahiptir, bu da kullanıcıların hızlıca sanal odalar oluşturmasını ve katılmasını sağlar. Kurulum gerektirmez, doğrudan tarayıcı üzerinden çalışır. Bilgisayar, tablet, akıllı telefon ve sanal gerçeklik cihazları üzerinden erişim sağlanabilir. Kullanıcılar sanal odalarda eş zamanlı olarak çalışabilir, sohbet edebilir ve içerik paylaşabilir. Kullanıcılar, sanal odalara medya dosyaları (resim, video) ve 3B modeller ekleyebilir. Kullanıcılar, sadece davetlilerin katılabileceği özel odalar oluşturabilir. Mozilla Hubs açık kaynaklı bir platformdur, bu da geliştiricilerin platformu inceleyip özelleştirmesine olanak tanır.	WEB tabanlı olması nedeniyle, yüksek kaliteli grafikler ve karmaşık sahnelerde performans sorunları yaşanabilir. Farklı tarayıcılar arasında performans ve uyumluluk farklılıkları olabilir. Profesyonel ve ticari artırılmış ve sanal gerçeklik uygulamaları için gerekli olan bazı gelişmiş özellikler eksik veya yetersiz olabilir. Kesintisiz ve hızlı bir internet bağlantısı gerektirir, bağlantı sorunları deneyimi olumsuz etkileyebilir. Çok sayıda kullanıcının aynı anda bağlandığı durumlarda sunucu yükü ve performans sorunları yaşanabilir.	Ücretsiz kullanıcılar için sınırlı teknik destek ve yardım mevcut olabilir. Mozilla Hubs'ın, Hubs Cloud adlı ücretli sürümü bulunmaktadır. Hubs Cloud, özellikle işletmeler ve organizasyonlar için daha fazla özelleştirme ve kontrol imkânı sunar.
Amazon Sumerian	Kurulum gerektirmez; doğrudan WEB tarayıcı üzerinden erişilebilir. Sürükle ve bırak arayüzü sayesinde kullanıcıların 3B sahneler ve artırılmış ve sanal gerçeklik deneyimleri oluşturmasını kolaylaştırır. Teknik bilgisi sınırlı olan kullanıcılar bile kodlama yapmadan projelerini geliştirebilir. Bilgisayar, mobil cihazlar ve sanal gerçeklik gözlükleri dahil çeşitli cihazlarla uyumludur. Güçlü bulut tabanlı yetenekler ekler. Birden fazla kullanıcının aynı projede eş zamanlı olarak çalışmasına olanak tanır, bu da iş birliğini ve verimliliği artırır. Amazon Lex ve Polly ile entegre çalışan holografik karakterler oluşturma imkânı sunar.	Platformun sunduğu geniş özellik yelpazesi, özellikle yeni başlayanlar için öğrenme sürecini zorlaştırabilir. İleri seviye özellikleri ve entegrasyonları kullanmak için teknik bilgi gerekebilir. WEB tabanlı bir platform olması, özellikle karmaşık ve grafik yoğun projelerde performans sınırlamalarına neden olabilir. Yüksek kaliteli artırılmış ve sanal gerçeklik deneyimleri için hızlı ve güvenilir bir internet bağlantısı gerektirir. Bazı kullanıcılar için platformun sunduğu özelleştirme seçenekleri yetersiz kalabilir, özellikle çok özel gereksinimleri olan projeler için.	Amazon Sumerian, AWS üzerinde çalıştığından, kullanım maliyetleri AWS hizmetlerine bağlıdır. Bu maliyetler, proje büyüklüğüne ve kullanım yoğunluğuna bağlı olarak artabilir.
Microsoft Azure Spatial Anchors	AG/SG içerikleri dünyaya sabitlenmesini isteniyorsa, Microsoft Azure Spatial Anchors kullanabilir. Bu sayede dijital ikizler belirli yerlere sabitlenerek kullanıcılara daha gerçekçi bir deneyim sunulabilir. Fiziksel dünya ile sanal dünyayı yüksek doğrulukla senkronize eder, bu da deneyimlerinin gerçek dünya ile tutarlı olmasını sağlar. Mekânsal ankrajlar, belirli fiziksel konumlarda kalıcı olarak yerleştirilebilir ve farklı oturumlarda erişilebilir. Azure Spatial Anchors, iOS, Android ve HoloLens cihazları arasında çapraz platform desteği sunar. Farklı cihazlardan aynı mekansal ankrajlara erişim ve paylaşım imkânı. Azure Spatial Anchors, diğer Azure hizmetleri ile kolayca entegre olabilir, bu da projelere güçlü bulut tabanlı yetenekler ekler. Birden fazla kullanıcı aynı anda aynı mekansal ankrajları kullanabilir ve gerçek zamanlı olarak etkileşime geçebilir. Gelişmiş mekansal haritalama yetenekleri, karmaşık artırılmış gerçeklik sahneleri oluşturmayı kolaylaştırır.	Hizmetlerin düzgün çalışabilmesi için sürekli internet bağlantısı gerektirir. Azure ekosistemine bağımlı olma durumu, platform değiştirmek isteyenler için esneklik kısıtlaması getirebilir. Azure hizmetleri ve mekansal ankrajlar hakkında bilgi sahibi olmak, platformun etkin kullanımı için gereklidir. Azure SDK ve API'lerini kullanmak başlangıçta zorlayıcı olabilir. Gerçek zamanlı iş birliği ve mekansal haritalama özellikleri, düşük gecikme ve yüksek performans gerektirir, bu da bazı durumlarda zorluklar yaratabilir. Tüm cihazlar ve platformlar arasında tutarlı performans sağlamak zor olabilir. Kullanıcı verilerinin güvenliği ve gizliliği konusunda dikkatli olunması gereken durumlar olabilir. Veri saklama ve işleme ile ilgili uyumluluk gereksinimlerini karşılamak zor olabilir.	Azure Spatial Anchors kullanımı, Azure hizmetlerine dayalı ücretlendirme modeli ile çalışır. Bu maliyetler, kullanım miktarına bağlı olarak artabilir. Azure platformunun diğer hizmetleri ile entegrasyon durumunda ek maliyetler ortaya çıkabilir.
PlayCanvas	Sürükle ve bırak arayüzü sayesinde kullanıcıların hızlı bir şekilde 3B sahneler oluşturmasını sağlar. Teknik bilgi gereksinimi minimaldir ve öğrenmesi kolaydır, bu da yeni başlayanlar için idealdir. Doğrudan tarayıcı üzerinden çalışır, herhangi bir ek eklenti veya yazılım indirme gerektirmez. Projeler bulut üzerinde saklandığı için herhangi bir cihazdan kolayca erişilebilir ve düzenlenebilir. Masaüstü, mobil cihazlar ve sanal gerçeklik cihazları ile uyumlu çalışır. Modern tarayıcıların çoğunda sorunsuz çalışır. Birden fazla kullanıcının aynı projede eş zamanlı olarak çalışmasına olanak tanır, bu da ekip performansını ve iş birliğini artırır. PlayCanvas, yüksek performanslı 3B grafikler ve etkileşimli deneyimler sunar. JavaScript tabanlı betik düzenleyici ile gelişmiş özelleştirme ve etkileşimli içerikler oluşturma imkânı sağlar.	İleri düzey projeler ve özelleştirmeler için JavaScript bilgisi gereklidir. Bazı gelişmiş özelliklerin ve fonksiyonların öğrenilmesi zaman alabilir. Çok büyük ve karmaşık sahnelerde performans sorunları yaşanabilir. WEB tabanlı olması nedeniyle tarayıcı performansı ve özellikleri ile sınırlı olabilir. Platformun sağladığı araçlar ve bileşenler bazı projeler için yeterli olmayabilir. Daha popüler platformlara kıyasla daha küçük bir topluluğa sahip olabilir, bu da kaynak ve destek bulmayı zorlaştırabilir.	Ücretsiz plan, depolama ve özellikler açısından sınırlamalar içerir. Daha fazla özellik ve depolama alanı için ücretli planlara ihtiyaç duyulabilir. Profesyonel projeler için gereken gelişmiş özellikler ve daha fazla depolama alanı ücretli planlarla sağlanır, bu da ek maliyetler getirebilir.

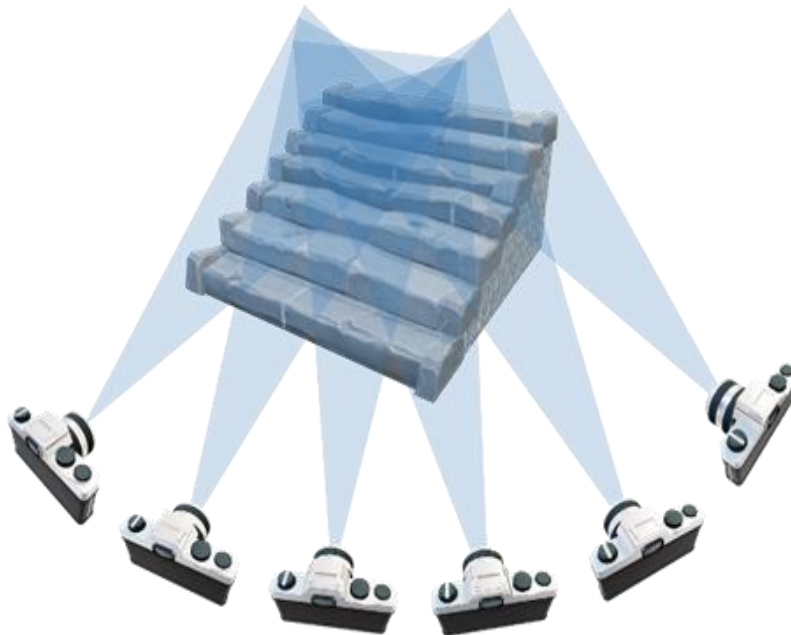
Platformların avantajların yanında her birinin ayrı ayrı dezavantajları da bulunmaktadır. Özellikle paylaşım ve görselleştirme işlemi, ek depolama veya üst özelliklere erişimlerin ücretli olması en büyük dezavantajlardan biridir. Ücretsiz sürümler ise sınırlı depolama alanı sahiptir ve kullanıcıların sınırlamalarla karşılaşmasına neden

olabilmektedir. Ücretsiz platformlar genellikle içerikleri kamuya açık olmakta ve bu da gizlilik sorunlarına yol açabilmektedir. Hassas verileri içeren 3B modellerin bu platformlarda barındırılması sakıncalı olmaktadır. Ayrıca ücretsiz platformlar, kullanıcıların 3B içeriklerinin görünürlüğü ve yönetimi üzerinde sınırlı kontrole izin vermektedir. Bazı platformlar, sınırlı teknolojik yeteneklere sahip olabilir veya belirli WEB tarayıcıları veya cihazlarla uyumsuzluk yaşayabilir. Her platformun kendine özgü avantajları ve dezavantajlarından dolayı uygun platformun seçimi projenin gereksinimlerine ve hedeflerine bağlı olmalıdır [64]. Yukarıda verilen avantaj ve dezavantajlar ışığında Tablo 1 ve Tablo 2’de WEB tabanlı artırılmış ve sanal gerçeklik platformları verilmiştir. Tablo 1’de ücretsiz veya kısmen ücretli olan platformlar yer alırken Tablo 2’de ücretli veya kısıtlı erişime sahip platformlara yer verilmiştir.

Bu platformlar, 3B içeriklerin oluşturulmasını, depolanmasını ve paylaşılmasını kolaylaştırır. Ayrıca, WEB tabanlı SG projelerinin geliştirilmesi için de kullanılabilirler. SG projeleri için 3B içeriklerin doğru bir şekilde hazırlanması ve bu platformlara entegre edilmesi, kullanıcıların etkileyici SG deneyimleri yaşamalarına olanak tanımaktadır [66]. 3B model ve SG için WEB ortamındaki en önde gelen platform olan Sketchfab [67] bu çalışmada tercih edilmiştir. Sketchfab, 2012 yılında Alban Denoyel (Sketchfab’ın CEO’su ve kurucu ortağı) ve Pierre-Antoine Passet (Sketchfab’ın CTO’su ve kurucu ortağı) tarafından Paris, Fransa’da kurulmuştur. Sketchfab platformunun seçilmesindeki en önemli etken, WEB ortamındaki en güçlü 3B model görüntüleyicilerinden birine sahip olması ve kolay kullanım sağlaması gelmektedir. Sketchfab, bugüne kadar toplam 32 milyon ABD doları yatırım almıştır. Sketchfab’ın bir milyondan fazla aktif kullanıcısı bulunmakta ve Sketchfab’da üç milyondan fazla 3B model paylaşılmıştır [69]. Platformda özellikle karmaşık ve yoğun olan fotogrametrik 3B modellerin kullanıcılar tarafından kolayca her açıdan döndürebilir olması veya hızlı bir şekilde yakınlaşıp/uzaklaştırabilmesine imkân tanınması ve modelin ayrıntılarının farklı açılardan kolayca incelenebilmesi ve bazı modellerin içine girilebilmesi önemli etken olmuştur. Ayrıca kullanıcılar 3B modellerini belirli bir dosya boyutuna kadar Sketchfab’da ücretsiz olarak paylaşabilmekte ve modeller herkese açık olarak veya özel olarak paylaşılabilir. Kullanıcılar, birçok farklı 3B model dosya formatını yükleyebilirler ve bu modelleri kolayca saklayabilirler. Sketchfab, 3B modelleri SG uygulamalarıyla entegre etmeyi kolaylaştırdığı gibi Sketchfab’ın API’sini kullanarak, 3B modelleri mobil uygulamalara, WEB sitelerine ve sanal gerçeklik deneyimlerine eklenebilmesi diğer bir tercih sebebi olmuştur.

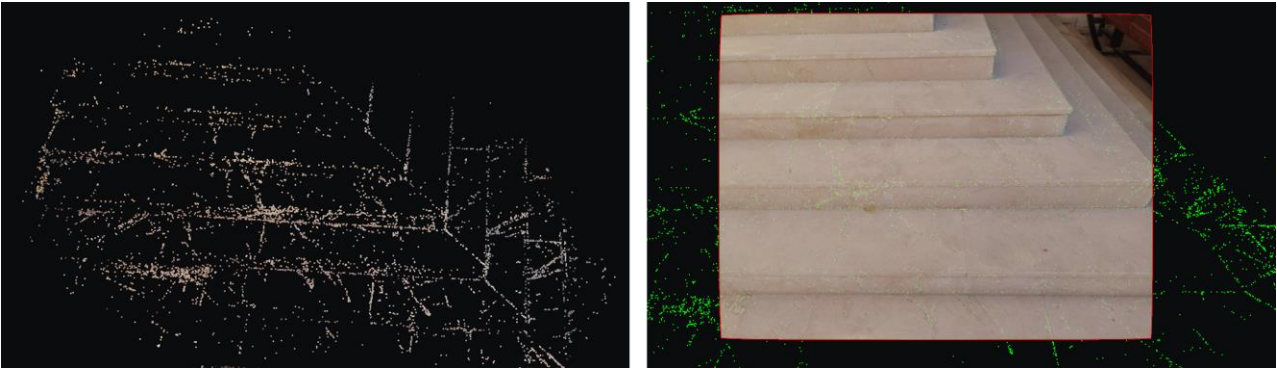
3. Bulgular

Bu çalışma, fotogrametri ile üretilen 3B modelleri kullanarak yapıdaki çatlakları otomatik olarak tespit etmeyi ve hasarla artırılmış dijital ikiz üretmek yapısal denetimlere yeni bir bakış açısı sunmayı amaçlamaktadır. Önerilen teknik modern bir yapının giriş kısmında bulunan merdiven basamakları üzerinde denenmiştir. Çalışmada veri toplamada ve dijital ikizin ilk aşaması olan 3B modelin üretiminde yakın resim fotogrametrisi kullanılmıştır. Test alanının görüntüleri manuel bir şekilde ortalama %80 boyuna ve enine bindirme olacak şekilde çekilmiş olup Şekil 2’de gösterildiği gibi çekim planı gerçekleştirilmiştir. Görüntü toplama süresi yaklaşık on dakika sürmüştür.



Şekil 2. Yakın resim fotogrametrisine uygun görüntü çekim senaryosu

3B model üretiminde kullanılan fotogrametri yöntemi ve SfM algoritması nesneye ait herhangi bir kontrol veya referans noktası olmadan sıralı çekilen görüntülerden ürün üretimine imkân tanımaktadır. Fakat bu çalışmada mümkün olan en hassas ve duyarlı 3B modeli oluşturmak için referans amaçlı hassas ölçüm cihazları kullanılarak hedef işaretleri yerleştirilmiş ve ölçümleri alınmıştır. Hedef işaretleri test nesnesi boyunca doğal köşe birleşim noktalarından eşit olacak şekilde toplanmıştır. Model üretim işlemi Context Capture yazılımında gerçekleştirilmiştir. Test nesnesinin fotogrametrik olarak işlenmesi yaklaşık 2 saat sürmüştür. Fotogrametrik sürecin ilk aşaması olan görüntü hizalama işlemi sırasında nesne yüzeyinde tanımlanan on üç hedef işareti kullanılmıştır. Bu işaretler hem hizalama sürecine katkı sağlamıştır hem de modelin gerçek ölçüsüne göre ölçeklendirilmesini sağlamıştır. Hizalama işleminde gerekli olan kamera parametreleri yazılımın kütüphanesinden otomatik olarak içe aktarılmıştır. Görüntü hizalamasının ardından algoritma bir ön model (seyrek nokta bulutu) oluşturmuştur (Şekil 3). Bu aşamada, model doğruluğu için belirlenen denetleme noktaları hizalama için kullanılmamalıdır. Test nesnesi için 3B modelin hata değeri kontrol noktaları aracılığıyla belirlenmiştir. Gerçek görüntülerden üretilen 3B modellerin kalitesi test nesnesi için ortalama 0,088 mm YÖA/piksel ile oluşturulmuştur. Önerilen yöntemde elde edilen görüntünün kalitesi (YÖA değeri) sonuç ürünün doğruluğu ile güçlü bir şekilde ilişkilidir ve önem arz etmektedir bu yüzden hassas olması gerekmektedir. YÖA değeri ne kadar kaliteli olursa, algoritma o kadar doğru çalışmaktadır. Oluşturulan ön modelden sonra SfM algoritması ile önce arka planda yoğun nokta bulutu oluşturulmuştur ve ardından yüksek çözünürlüklü fotogerçekçi 3B doku modeli üretilmiştir (Şekil 4). Modelin geometrik analizi, yöntemler bölümünde ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Analizde doğal hedefler kullanılmış olup denetleme noktası olarak tanımlanan sekiz hedef doğruluk analizinde kullanılmıştır.

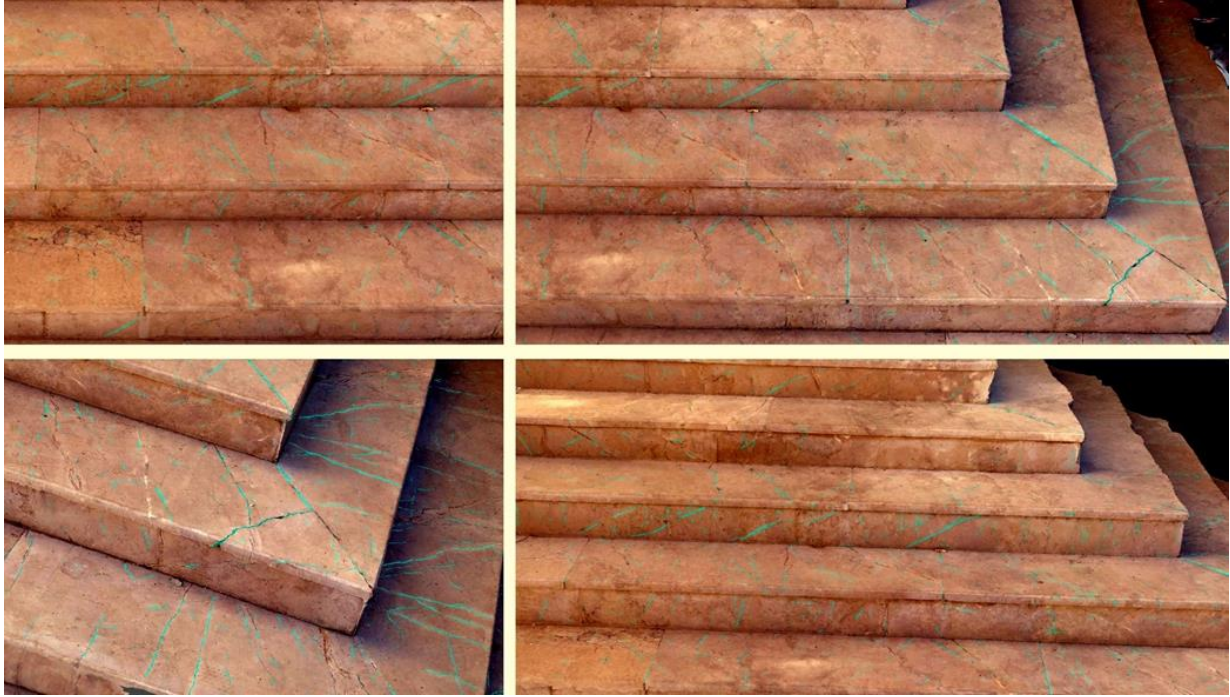


Şekil 3. Fotogrametrik ön hizalama sonucu oluşan seyrek nokta bulutu (sol) ve resim üzerinde ortak eşleşen noktalar (sağ)



Şekil 4. Fotogrametrik değerlendirme sonucunda üretilen 3B model genel görünümü ve yakın gösterimi

Doğruluk analizi için Denklem 4 kullanılmış ve bulgular Tablo 3'te sunulmuştur. Tablo 3, test nesnesi için üretilen 3B modelin doğruluk değerlerini göstermektedir. Test nesnesi, Tablo 3'e göre oldukça yüksek doğrulukta üretilmiştir. Bu doğrulukta 3B model üretmenin başlıca nedeni test nesnesinin boyutunun küçük olması, karmaşıklığının oldukça az olması ve görüntülerin oldukça yüksek çözünürlükte olması gösterilebilir. Yüksek kaliteli 3B model üretildikten sonra çatlaklar otomatik olarak tespit edilmiştir. 3B model üzerinde çatlakları tespit etmek için kullanılan teknik, ilk görünümün görüntüsü üzerinde eğitilen makine ve derin öğrenme modelleri aracılığıyla cephe segmentasyonu yapılmasını gerektirmektedir. Bu aşamada, tanınan açıklıkların köşeleri, uygun köşeleri tespit etmek için birinci görünümünden ikinci görünüme aktarılır. Bu çalışmada kullanılan Insight Detector araçları, 3B modellerdeki çatlakları tespit etme konusunda yetkin olup çatlakların boyutunu, derinliğini ve konumunu değerlendirmeye yardımcı olabilir. Insight Detector araçlarının matematiksel modeli, 3B modeldeki yüzey eşitsizliklerini inceleyen bir dizi algoritma içerir. Insight Detector araçları ile Komşuluk Birleştirme ve Eğrilik Tahmini algoritmaları derin öğrenme algoritmalarına dayanmaktadır. Önceden eğitilmiş modeller, verilen 3B modelin yüzey tutarsızlıklarını analiz etmek için kullanılmıştır. Komşuluk Birleştirme ve Eğrilik Tahmini algoritmaları, görüntü ve videolardaki nesnelere yetkin bir şekilde tanıyan Evrişimli Sinir Ağları algoritmalarına dayanmaktadır. Etiketli veriler kullanılarak eğitilen denetimli öğrenme algoritmaları da bu tür yüzey farklılıklarını belirleme yeteneği kazanır. Bu tür mimarilerin uygulanması göz önüne alındığında, Insight Detector 3B modellerdeki çatlakları güvenilir bir şekilde tespit eder. Hasarla artırılmış dijital ikiz çıktımız, 3B modelden alınan geometrik verileri tanımlanan ve karakterize edilen hasar ile birleştirmeyi amaçlamaktadır. Çalışmamızı eğitmek için kullanılan Bentley'in Context Capture kütüphanesinde yer alan görüntülerin tutarlı nitelikleri göz önüne alındığında, bu yöntemi çatlak analizi için mevcut karşılaştırma ölçütü olarak kullandık. Dokulu bir 3B modelin cephesindeki birkaç çatlak, makine öğrenimi ve derin öğrenme teknikleri kullanılarak tespit edildi. Çatlaklar Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5. Fotogrametri yöntemi ve SfM algoritması ile üretilen 3B model üzerinden tespit edilen çatlakların (mavi çizgiler) gösterimi

Tablo 3. Test Nesnesi İçin Fotogrametri Yöntemi ile Üretilen 3B Modelin Geometrik Doğruluk Analizi

No	Vx	Vy	Vz	VxVx	VyVy	VzVz	RMSE _{x,y,z}		
DN1	-0.100	0.180	0.380	0.010	0.032	0.144			
DN2	0.370	-2.800	-1.280	0.137	7.840	1.638			
DN3	-0.120	0.210	0.120	0.014	0.044	0.014			
DN4	0.240	0.480	-0.320	0.058	0.230	0.102	0.859	1.353	0.825
DN5	-2.300	1.800	0.840	5.290	3.240	0.706			
DN6	0.160	-0.780	-1.320	0.026	0.608	1.742			
DN7	-0.270	1.620	1.020	0.073	2.624	1.040			
DN8	0.540	0.120	-0.240	0.292	0.014	0.058			

*Birimler cm'dir.

Test nesnesinin 3B modelinin geometrik hassasiyetini zaten değerlendirmiştik. Çatlakların otomatik tespitinden ilk olarak görsel inceleme yapılmış ve çatlakların neredeyse tamamı tespit edilmiştir. Fakat bazı çatlaklar özellikle gölgenin düştüğü alanlarda tespit edilemediği görülmüştür. İkinci metrik analizde manuel olarak ölçülen belirli çatlakların uzunluğu 3B modelin çatlaklarla bütünleştirilmesiyle oluşturulan hasarla artırılmış dijital ikizde yan yana getirdik. Test nesnesi için toplam on çatlak uzunluğu uzmanların rehberliğinde karşılaştırma için değerlendirilmiştir ve sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir.

Test çalışmasından elde edilen sonuçlar, metodolojimizin tüm bileşenlerinin etkili bir şekilde işlediğini doğrulamaktadır. Yöntem tatmin edici bir doğruluk yakalamıştır ve görsel inceleme sonucunda çatlakların çoğunun tespit edildiği görülmektedir. Metodoloji bu çalışma sonuçlarına göre başarılı gözükse de özellikle çatlak segmentasyonu için kullanılan yaklaşımlarda eğitim kütüphaneleri her çalışma alanına özgü olduğu için, kullanıcının daha iyi eğitilmiş modellere sahip olması durumunda sonuçların doğruluğu değiştirilebilir. Metodolojinin etkinliği büyük ölçüde görüntü verilerinin kalitesine bağlıdır. Görüntü boyutları, çözünürlük, bulanıklık ve bozulma gibi faktörlerin etkisi dikkate alınmalıdır. Ancak, bu bizim çalışmamızın kapsamı dışındadır. Çalışmamızın sonuçlarının kesinliği, segmentasyon tekniklerinde kullanılan SfM ve derin öğrenme algoritmalarının etkinliğine bağlıdır. Modellerimizi eğitmek için kullanılan verilerin ve ek açıklamaların kalitesi ve miktarı derin öğrenme sonuçlarını önemli ölçüde etkilemektedir.

Sonuç olarak, çatlak segmentasyonunda yanlışlıklar ve belirsizlikler ortaya çıkabilir. Bu durum, önceden eğitilmiş modellerin kullanılmasına bağlanmaktadır. Sonuçlar, geliştirilmiş derin öğrenme modellerinden ve manuel müdahale veya otomatik eleme yoluyla çatlak olarak belirlenen hatalı verilerin hariç tutulmasından kazanç sağlamaktadır. Amaç, hızlı hasar tespiti için mevcut uygulamayı iyileştirmektir. Bu, çatlakların derinliğinin tespit edilmesi de dâhil olmak üzere hasar özelliklerinin kapsamlı bir şekilde incelenmesini gerektirebilir. Araştırmaların genel sonuçlarına bakıldığında hızlı hasar değerlendirmesine yönelik mevcut uygulamayı iyileştirmeler geliştirilmektedir. Bu yöntemle hızlı değerlendirmeden sonra, hasar özelliklerinin daha derin bir analizi gerekebilir (örneğin, çatlakların derinliklerinin tahmin edilmesi). Bununla birlikte elde edilen sonuçlar son olarak WEB tabanlı görselleştirme ve sanal gerçeklik platformuna aktarılmıştır. Bu sayede uzmanlar yerinde incelemelere alternatif olacak denetimler gerçekleştirebilmektedir. WEB tabanlı sanal gerçeklik, erişilebilirlik avantajı da sunar. İndirme ve kurulum gerektiren yerel SG uygulamalarının aksine WEB tabanlı SG'ye bir WEB bağlantısı üzerinden erişilebilir ve bu da kullanıcıların SG deneyimlemesini kolaylaştırır. Ek olarak WEB tabanlı SG, gerçek zamanlı güncellemelere ve daha dinamik bir kullanıcı deneyimine izin vererek içerik dağıtımını açısından daha fazla esneklik sunar. Yüksek performanslı cihazlara duyulan ihtiyaç ve yüksek internet hızları gibi ele alınması gereken zorluklar olsa da fotogrametri yöntemiyle üretilen 3B dijital ikizlerin WEB tabanlı sanal gerçeklik temsilinin geleceği umut verici görünüyor. Teknolojide devam eden ilerlemeler ve bağlantılı cihaz pazarının büyümesiyle, önümüzdeki yıllarda bu sürükleyici ve etkileşimli deneyimlerin daha fazlasını görmeyi bekleyebiliriz. Çalışmada üretilen yüksek kalitede 3B fotogerçekçi yöntem kısmında belirtilen sebepler dikkate alınarak Sketchfab WEB tabanlı SG görselleştirme platformuna yüklenmiştir (Şekil 6). Şekil 6'da verilen sanal platformdaki dijital ikizler hem karekod okutulularak WEB tabanlı görselleştirilebilir hem de sanal gerçeklikte kullanılabilir ve bu sayede diğer kullanıcılara sunulabilir.

WEB tabanlı platforma yüklenen hasarla artırılmış dijital ikizin Şekil 6'da verilen karekodu okutulularak veya bağlantı adresine tıklanarak söz konusu WEB tabanlı SG platformu açılabilir. Bu aşama aynı şekilde SG başlığında bir tarayıcıda adres çubuğuna Şekil 7'de gösterildiği gibi girilerek platforma giriş yapılabilir. Platforma giriş yapıldıktan sonra SG giriş sekmesine (View in VR) tıklanarak Şekil 8'de gösterilen arayüze giriş sağlanabilmektedir. Bu sayede WEB tabanlı sanal gerçeklik platformunda hasarla artırılmış dijital ikiz ile yapısal denetim uzmanlar tarafından yapılabilir.

Tablo 4. Test nesnesi için fotogrametri yöntemi ile üretilen 3B modelden tespit edilen çatlakların doğruluk analizi

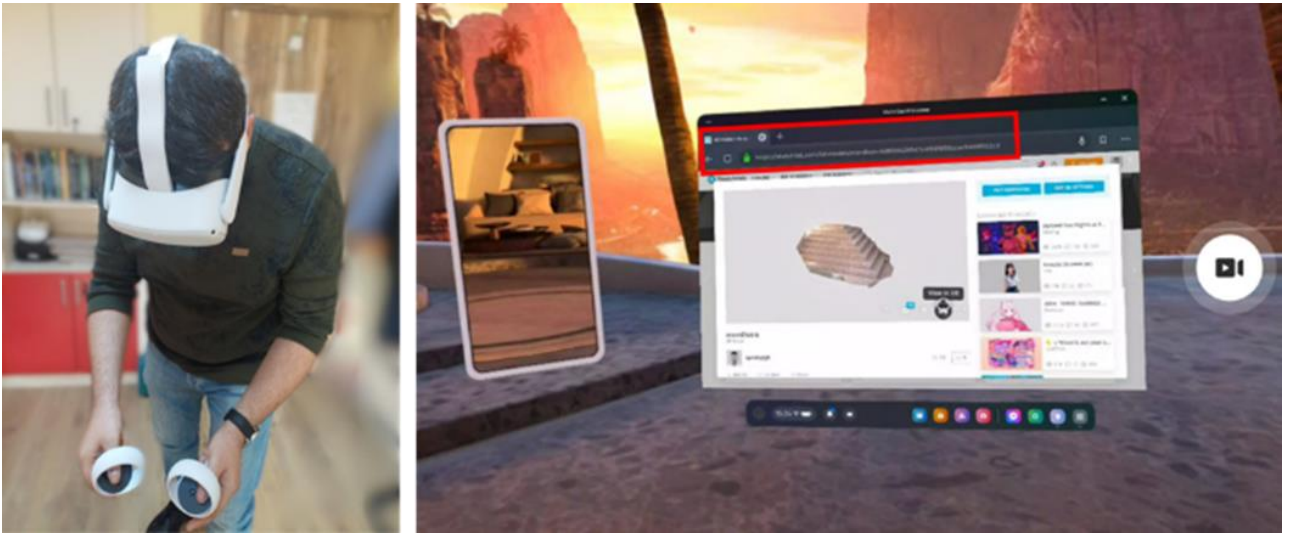
Çatlak No	Klasik ölçüm (cm)	Otomatik tespit (cm)	$ D_i $ (cm)	RMSE _D
1	0.620	0.700	-0.080	
2	4.850	4.768	0.082	
3	10.640	10.556	0.084	
4	4.910	4.868	0.042	
5	4.680	4.486	0.194	
6	8.070	8.156	-0.086	0.097
7	5.260	5.364	-0.104	
8	7.090	7.020	0.070	
9	6.450	6.400	0.050	
10	15.370	15.468	-0.098	

WEB tabanlı Görselleştirme Linki

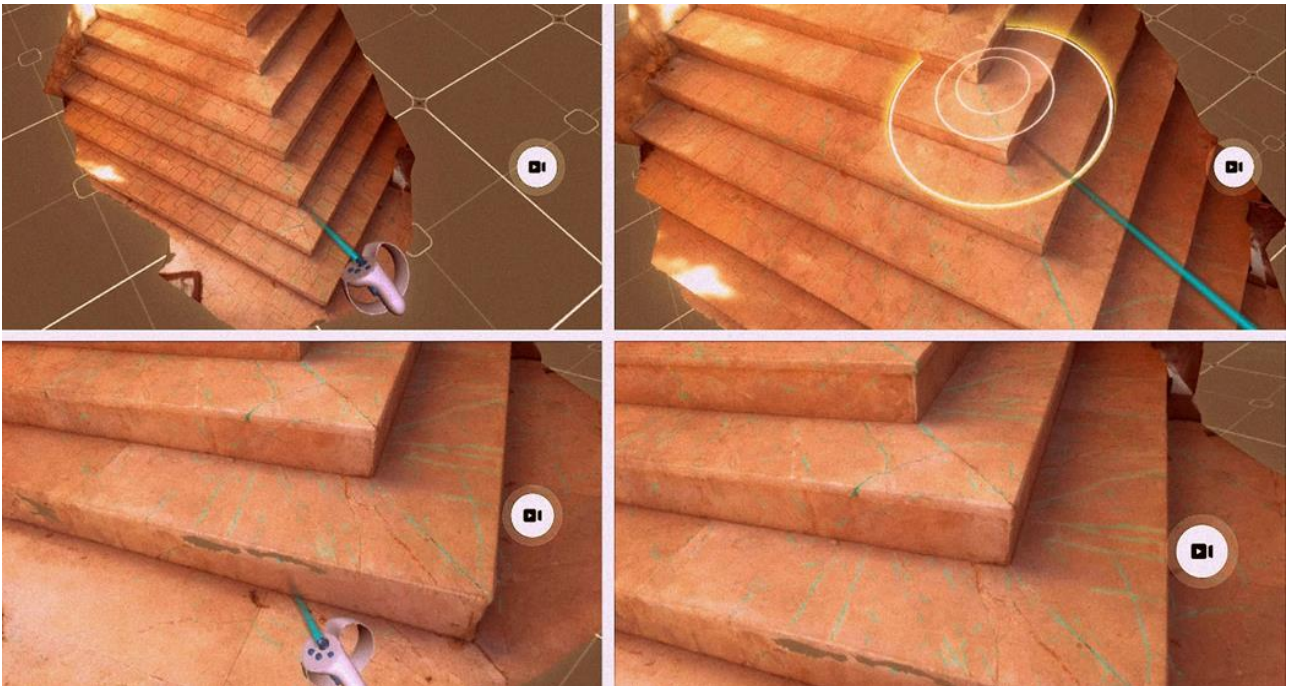
<https://skfb.ly/oh7RX>



Şekil 6. Hasarla artırılmış dijital ikiz ve WEB tabanlı sanal gerçeklik bağlantısı (<https://skfb.ly/oh7rx>) gösterimi



Şekil 7. Sanal gerçeklik başlığı ve WEB tabanlı sanal gerçeklik giriş arayüzü



Şekil 8. WEB tabanlı sanal gerçeklik arayüzü ve hasarla artırılmış dijital ikiz ile yapısal denetim

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma, zahmetli, öznel, maliyetli ve belgelenmesi zor bir süreç olan yapıların denetimini geliştirmeyi amaçlamaktadır. Önerilen yöntem, yapıların daha objektif ve verimli bir şekilde değerlendirilmesinin önünü açmaktadır. Metodoloji, basitleştirilmiş bir poligonal 3B yüzey modeli oluşturmak için SfM tabanlı fotogrametri yöntemi aracılığıyla çok sayıda görüntünün işlenmesini içerir. Üretilen 3B modelden derin öğrenme modeli tarafından belirlenen çatlaklar otomatik olarak tespit edilir ve 3B model ile entegre edilerek hasarla artırılmış dijital ikiz üretilir. Yapısal sağlık izleme amacıyla binaların dijital ikizlerine dayanan mevcut yöntemlerin aksine, önerilen teknik kullanıcı müdahalesi gereksinimlerini azaltmaktadır. Ayrıca hızlı değerlendirmeler ve depolama için uygun kısa bir model oluşturur. Bu sayede yapısal denetimlerde maliyet, hız, doğruluk ve uygulanabilirlik açısından büyük avantajlar sağlanmaktadır. Dahası, görüntü verilerinden elde edilen bilgilerin entegrasyonuna izin verir ve çeşitli varlıklara uygulanabilir. Yaklaşımın etkinliği görüntü verilerinin kalitesine bağlıdır. Görüntü boyutu, çözünürlük, bulanıklık ve gürültü gibi farklı faktörlerin etkisi göz önünde bulundurulmalıdır. Görüntülerde düşük pürüzlülüğe veya yetersiz fazlalığa sahip dokuların başarısız olma olasılığı daha yüksektir. Bunlara ek olarak çeşitli gölge gibi çevresel koşullar ve farklı yapı türleri üzerinde bu yöntemin etkinliğini olumsuz etkilenmektedir. Ek olarak farklı zaman/dönem/mevsimlerde, gün ışığı koşullarında ve yapı malzemelerinde yöntemin doğruluk oranları etkileneneği unutulmamalıdır. Bu durumlar sonuçta yanlışlıklara ve belirsiz çatlak segmentasyonuna neden olabilmektedir.

Bu çalışmanın bulguları ve sonuçları yöntemin etkinliğini göstermektedir. Bu teknik, güçlendirilmiş yapılardaki sapmalar ve çatlaklar gibi bozulmalar da dâhil olmak üzere ilgilenilen küçük nesnelere taranmasına, tespit edilmesine ve bunlar hakkında bilgi alınmasına olanak tanır. Bununla birlikte, yakın resim fotogrametrisi daha büyük yapılara sahip kapsamlı projeler için uygun değildir. Fotogrametri, birden fazla kamera açısı, önemli miktarda zaman, daha fazla görüntü ve bazı binalar için çeşitli konumlardan karşılaştırılabilir bilgi elde etmek için olası tüm yüzeyleri inceleme ihtiyacı gerektirdiğinden bir zorluk teşkil etmektedir. Bu kısıtlamalar İHA fotogrametrisi ile aşılabılır. İHA fotogrametrisi, yapıları belgeleyen önceki araştırmalarda kanıtlandığı gibi, büyük nesnelere için yeterli ayrıntıya sahip geometrik veriler sağlayabilir.

Genel olarak, önerilen yöntemin 3B model üretiminde kalite açısından büyük başarı elde ettiği gözlemlenmiştir. Ayrıca bu başarı, makine öğrenimi ve derin öğrenme algoritmaları aracılığıyla otomatik bir şekilde çatlak tespiti hassasiyetini önemli ölçüde artırmıştır. Kullanılan eğitim modelinin, açıkça işaretlenmiş öznel değerlendirmelerle deneysel verilere uygun olması gerektiğini vurgulamak önemlidir. Böylece, hasar tespiti için yerinde denetimler yerine bu yaklaşım kullanılarak düşük maliyetli denetimler daha hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilir. Bu çerçevenin en önemli avantajının gerçek zamanlı kullanıma olanak sağlaması olduğunu tahmin ediyoruz ve WEB tabanlı SG uygulamalarının denetim sürecini hızlandırabilmektedir. Sonuçların daha fazla kullanıcıya ulaşması günümüz internet teknolojisiyle daha mümkün hale gelmiştir. Elde edilen modellerin WEB tabanlı görselleştirilme sayesinde gerçekçi bir deneyime ulaşılmasının mümkün olduğu ve E-arşiv gibi sanal ortamların hızlı ve etkili bir biçimde yapılabileceği gösterilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada üretilen dijital ikiz ve SG entegrasyonu ile işlevsel bir tasarım geliştirerek yapı yönetimindeki mühendislik çalışmalarının mevcut uygulamalarına nasıl katkıda bulunabileceğini gösterilmiştir. Dijital ikizlerin mevcut uygulamada uygulanması çeşitli zorluklarla karşı karşıyadır. Dijital ikizleri mevcut uygulamada uygulamak için önce bir 3B veri modeli geliştirmek gerekir. Ancak, bir 3B veri modeli geliştirmek teknik olarak karmaşık ve finansal olarak pahalıdır. Ayrıca, inşaat sektörü oldukça karmaşıktır. Mühendislik çalışmaları için mevcut yapı yönetimi uygulamalarında dijital ikizlerin uygulanmasının, yapı durumunun denetlenmesi, analizlerinin yapılması ve daha verimli ve etkili bir görsel sunum için SG entegreli kullanımının uygulanması önemli bir aşama olacaktır.

Sonuç olarak gerçek dünyanın tam ve eksiksiz bir modeli doğru ve hızlı bir veri toplama süreci ile bunun temsili olan dijital ikiz kavramında geçmektedir. Bir dijital ikiz geliştirmede ise fotogrametri yöntemleri modelin tam temsili en iyi yansıtan yöntemlerdir. Elde edilen verilerin anlamlı hale getirilmesi ile ortaya çıkan dijital ikizin ise SG gibi görselleştirme araçları ile kullanıcıya aktarılması analiz ve temsile önemli katkılar sunmaktadır. Çalışma sonunda yapısal 3B modellerin denetim ve analizleri yapılarak SG görselleştirme araçları ile aktarılıp farklı kullanıcılara sunulmuştur. Elde edilen bulgular, gelecekteki dijital ikiz çalışmalarında en iyi temsil senaryolarının gelişmesine ve 3B modellerin SG ile entegrasyonu üzerinden denetim ve analizlerin yapılmasına katkı sağlayacaktır. Bu çalışma kapsamında irdelenen sanal gerçeklik platformları üzerinden uzmanların çatlak analizleri yapma deneyimleri ve kullanıcı geri bildirimleri yapılması diğer çalışmalara öncü bilgiler sunabilir. Bu yöntemin uygulanması için gerekli ekipman, yazılım ve uzmanlık seviyesi gibi faktörlerin detaylı bir şekilde ele alınması gerekmektedir. Ayrıca bu platformların kullanıcı dostu olup olmadığı, pratikçe karşılaşılan zorluklar ve potansiyel iyileştirmelerin neler olduğu konusunda araştırmalar gelecek çalışmalarda yapılacaktır. Son olarak önerilen yöntemler yapısal denetim için olumlu gözükse de dijital ikizler ve sanal gerçeklik platformlarının kullanımıyla ilişkili potansiyel gizlilik ve güvenlik sorunları dikkate alınmalıdır. Bu teknolojilerin kullanımı sırasında veri koruma ve gizlilik standartlarının nasıl sağlanacağına dair yönergeler iyi irdelenmelidir.

Teşekkür

Bu çalışma Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 23.FEN.BİL.17 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Ayrıca bu çalışma, ikinci yazarın danışmanlığında birinci yazarın doktora tez çalışmasının bir kısmını içermektedir.

Kaynakça

- [1] Masciotta, M. G., Ramos, L. F., Lourenço, P. B. 2017. The importance of structural monitoring as a diagnosis and control tool in the restoration process of heritage structures: A case study in Portugal. *Journal of Cultural Heritage*, 27, 36-47.
- [2] Fidan, Ş., Ulvi, A. 2022. Tarsus Aziz Pavlus Kilisesinin Yersel Lazer Tarama Teknikleri ile Üç Boyutlu Modelinin Oluşturularak Sanal Gerçekliğe Hazırlamanın Değerlendirilmesi. *Türkiye Lidar Dergisi*, 4(2), 60-70.
- [3] De Stefano, A., Matta, E., Clemente, P. 2016. Structural health monitoring of historical heritage in Italy: some relevant experiences. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6, 83-106.
- [4] Gattulli, V., Lepidi, M., Potenza, F. 2016. Dynamic testing and health monitoring of historic and modern civil structures in Italy. *Structural Monitoring and Maintenance*, 3(1), 71.
- [5] Ubertini, F., Comanducci, G., Cavalagli, N. 2016. Vibration-based structural health monitoring of a historic bell-tower using output-only measurements and multivariate statistical analysis. *Structural Health Monitoring*, 15(4), 438-457.
- [6] Zeybek, M., Kaya, A. 2020. Tarihi Yığma Kiliselerde Hasarların Fotogrametrik Ölçme Tekniğiyle İncelenmesi: Artvin Tbeti Kilisesi Örneği. *Geomatik*, 5(1), 47-57.
- [7] Mirdan, O., Yakar, M. 2017. Tarihi eserlerin İnsansız Hava Aracı ile modellenmesinde karşılaşılan sorunlar. *Geomatik*, 2(3), 118-125.
- [8] Şasi, A., Yakar, M. 2017. Photogrammetric modelling of sakahane masjid using an unmanned aerial vehicle. *Turkish Journal of Engineering*, 1(2), 82-87.
- [9] Blanco, H., Boffill, Y., Lombillo, I., Villegas, L. 2018. An integrated structural health monitoring system for determining local/global responses of historic masonry buildings. *Structural Control and Health Monitoring*, 25(8), e2196.
- [10] Yilmaz, I. 2009. A research on the accuracy of landform volumes determined using different interpolation methods. *Scientific Research and Essay*, 4(11), 1248-1259.
- [11] Yamazaki, F., Liu, W. 2016. Remote sensing technologies for post-earthquake damage assessment: A case study on the 2016 Kumamoto earthquake. 6th ASIA Conference on Earthquake Engineering (6ACEE) 22-24 Eylül, Cebu City, Philippines.
- [12] Hamal, S. N. G., Sarı, B., Ulvi, A. 2020. Using of Hybrid Data Acquisition Techniques for Cultural Heritage a Case Study of Pompeiopolis. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 2(2), 55-60.
- [13] Şenol, H. İ., Polat, N., Kaya, Y., Memduhoğlu, A., Ulukavak, M. 2021. Digital documentation of ancient stone carving in Şuayip City. *Mersin Photogrammetry Journal*, 3(1), 10-14.
- [14] Barazzetti, L., Banfi, F., Brumana, R., Oreni, D., Previtali, M., Roncoroni, F. 2015. HBIM and augmented information: towards a wider user community of image and range-based reconstructions. *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 40, 35-42.
- [15] Hoskere, V., Narazaki, Y., Hoang, T. A., Spencer Jr, B. F. 2018. Towards automated post-earthquake inspections with deep learning-based condition-aware models. *The 7th World Conference on Structural Control and Monitoring*, 7WCSCM, Temmuz, 22-25, Qingdao, China.

- [16] Jouan, P., Hallot, P. 2019. Digital twin: A HBIM-based methodology to support preventive conservation of historic assets through heritage significance awareness. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 609-615.
- [17] Angjeliu, G., Coronelli, D., Cardani, G. 2020. Development of the simulation model for Digital Twin applications in historical masonry buildings: The integration between numerical and experimental reality. *Computers & Structures*, 238, 106282.
- [18] Stepinac, M., Lulić, L., Ožić, K. 2022. The role of UAV and laser scanners in the post-earthquake assessment of heritage buildings after the 2020 earthquakes in Croatia. In *Advanced Nondestructive and Structural Techniques for Diagnosis, Redesign and Health Monitoring for the Preservation of Cultural Heritage: Selected work from the TMM-CH 2021*, Aralık, 167-177, Atena, Grčka
- [19] Rainieri, C., Rosati, I., Cieri, L., Fabbrocino, G. 2022, June). Development of the digital twin of a historical structure for SHM purposes. In *European Workshop on Structural Health Monitoring*, Haziran, 639-649.
- [20] Levine, N. M., Spencer Jr, B. F. 2022. Post-earthquake building evaluation using UAVs: A BIM-based digital twin framework. *Sensors*, 22(3), 873.
- [21] Batar, M. 2022. Word-based game development on Android with an efficient graphical data structure. *Turkish Journal of Engineering*, 6(3), 256-261.
- [22] Tanbour, H., Tanbour, E. 2023. A four-wall virtual reality visualization of patient-specific anatomy: Creating full user immersive experience from computed tomography scans. *Turkish Journal of Engineering*, 7(2), 134-140.
- [23] Ernst, F., Akdağ, S., Polat, N., Akaslan, D., Önal, M., & Ekinci, A. 2024. Development of a virtual reality application for the Old Harran School. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 9(1), 77-85.
- [24] Kaya, Y., Polat, N., Şenol, H. İ., Memduhoğlu, A., Ulukavak, M. 2021. Arkeolojik kalıntıların belgelenmesinde yersel ve İHA fotogrametrisinin birlikte kullanımı. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 3(1), 9-14.
- [25] Kaya, Y., Şenol, H. İ., Polat, N. 2021. Three-dimensional modeling and drawings of stone column motifs in Harran Ruins. *Mersin Photogrammetry Journal*, 3(2), 48-52.
- [26] Yılmaz, M., Uysal, M. 2016. Comparison of data reduction algorithms for Li DAR-derived digital terrain model generalisation. *Area*, 48(4), 521-532.
- [27] Yılmaz, M., Uysal, M. 2017. Comparing uniform and random data reduction methods for DTM accuracy. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 2(1), 9-16.
- [28] Erdoğan, A., Görken, M., Kabadayı, A. 2022. Study on the use of unmanned aerial vehicles in open mine sites: a case study of ordu province mine site. *Advanced UAV*, 2(2), 35-40.
- [29] Kabadayı, A. 2022. Maden sahasının insansız hava aracı yardımıyla fotogrametrik yöntemle haritalanması. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 4(1), 19-23.
- [30] Ulvi, A. 2018. Analysis of the utility of the unmanned aerial vehicle (UAV) in volume calculation by using photogrammetric techniques. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 3(2), 43-49.
- [31] Seyrek, E. C., Narin, Ö. G., Koçak, T., Uysal, M. 2021. Yüzey araştırmalarında İHA fotogrametrisinin kullanımı: Kolankaya Siperleri örneği. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 3(2), 69-75.
- [32] Ulvi, A. 2022. Using UAV photogrammetric technique for monitoring, change detection, and analysis of archeological excavation sites. *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*, 15(3), 1-19.
- [33] Fernández-Hernandez, J., González-Aguilera, D., Rodríguez-Gonzálvez, P., & Mancera-Taboada, J. 2015. Image-based modelling from unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry: an effective, low-cost tool for archaeological applications. *Archaeometry*, 57(1), 128-145.

- [34] Fonstad, M. A., Dietrich, J. T., Courville, B. C., Jensen, J. L., Carbonneau, P. E. 2013. Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. *Earth surface processes and Landforms*, 38(4), 421-430.
- [35] Javernick, L., Brasington, J., Caruso, B. 2014. Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry. *Geomorphology*, 213, 166-182.
- [36] Uslu, A., & Uysal, M. 2021. Kitle kaynaklı fotoğraflar kullanılarak kültürel mirasın üç boyutlu modellenmesi ve web tabanlı görselleştirilmesi: Afrodisiyas-Tetrapylon örneği. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(3), 632-639.
- [37] Bryson, M., Johnson-Roberson, M., Murphy, R. J., Bongiorno, D. 2013. Kite aerial photography for low-cost, ultra-high spatial resolution multi-spectral mapping of intertidal landscapes. *PloS one*, 8(9), e73550.
- [38] Gomez, C., Hayakawa, Y., Obanawa, H. 2015. A study of Japanese landscapes using structure from motion derived DSMs and DEMs based on historical aerial photographs: New opportunities for vegetation monitoring and diachronic geomorphology. *Geomorphology*, 242, 11-20.
- [39] Akay, S. S., & Özcan, O. 2023. UAV and smartphone-based 3D modeling integration with augmented reality (AR) animation. *Advanced UAV*, 3(2), 91-99.
- [40] Dietrich, J. T. 2017. Bathymetric structure-from-motion: Extracting shallow stream bathymetry from multi-view stereo photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(2), 355-364.
- [41] Şenkal, E., Kaplan, G., Avdan, U. 2021. Accuracy assessment of digital surface models from unmanned aerial vehicles' imagery on archaeological sites. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 6(2), 81-89.
- [42] Ahmadabadian, A. H., Karami, A., Yazdan, R. 2019. An automatic 3D reconstruction system for texture-less objects. *Robotics and Autonomous Systems*, 117, 29-39.
- [43] Michele, M., Giuseppe, M., Salvatore, Z. 2017. Low cost digital photogrammetry: From the extraction of point clouds by SFM technique to 3D mathematical modeling. In *AIP conference proceedings*, Temmuz, 1863(1).
- [44] Bentley. 2023. Bentley Context Capture, 2023. Available at <https://www.bentley.com/en/products/brands/contextcapture>. Accessed 27 April 2024. Online document
- [45] Bentley. 2023. Context Capture User Guide, 2023. Available at <https://docs.bentley.com/LiveContent/index.html>. Accessed 27 April 2024. Online document
- [46] Fryskowska-Skibniewska, A., Delis, P., Kedzierski, M., Matusiak, D. 2022. The conception of test fields for fast geometric calibration of the FLIR VUE PRO thermal camera for low-cost UAV applications. *Sensors*, 22(7), 2468.
- [47] Uray, F., Varlık, A., Metin, A. 2018. Üç Boyutlu Kent Modellerinde Ayrıntı Düzeyi Kavramı İnce Minareli Medrese (Konya) Örneği. *Geomatik*, 3(1), 74-83.
- [48] Buhur, S., Uluğtekin, N., Gümüşay, M. Ü., Musaoğlu, N. 2023. Turistik amaçlı mekânsal sanal ortamların oluşturulması: Tarihi Yarımada Örneği. *Geomatik*, 8(2), 99-106.
- [49] Zhang, A., Wang, K. C., Li, B., Yang, E., Dai, X., Peng, Y., Chen, C. 2017. Automated pixel-level pavement crack detection on 3D asphalt surfaces using a deep-learning network. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 32(10), 805-819.
- [50] Debroy, S., Sil, A. 2022. An apposite transfer-learned DCNN model for prediction of structural surface cracks under optimal threshold for class-imbalanced data. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 7(1), 83.

- [51] Park, D. 2023. Stability evaluation of rock slopes with cracks using limit analysis. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1-19.
- [52] Fu, Y., Downey, A. R., Yuan, L., Zhang, T., Pratt, A., Balogun, Y. 2022. Machine learning algorithms for defect detection in metal laser-based additive manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 75, 693-710.
- [53] Zeng, S., Chen, J., Cho, Y. K. 2020. User exemplar-based building element retrieval from raw point clouds using deep point-level features. *Automation in Construction*, 114, 103159.
- [54] Al-Thelaya, K., Gilal, N. U., Alzubaidi, M., Majeed, F., Agus, M., Schneider, J., Househ, M. 2023. Applications of discriminative and deep learning feature extraction methods for whole slide image analysis: A survey. *Journal of Pathology Informatics*, 14, 100335.
- [55] Araz, G. 2021. Doğa görünümlerinin sanal uzaya yansımalarının dijital sanat bağlamında incelenmesi. *Anadolu Üniversitesi, Güzel Sanatlar Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri*.
- [56] Karaca, Ş., Önem, E. Ö. 2023. Dijital ikiz teknolojisinin turizm sektöründe kullanım alanları ve etkileri. *Kayseri Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 5(2), 158-168.
- [57] Aytekin, P., Yakın, V., Çelik, B. H. 2020. Artırılmış gerçeklik teknolojisinin pazarlamadaki yeri. *AJIT-e: Academic Journal of Information Technology*, 10(39), 87-117.
- [58] Yiğit, A. Y., Uysal, M. 2023. Dijital ikizlerin geliştirilmesinde fotogrametrinin kullanımı ve artırılmış gerçeklik ile görselleştirilmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(4), 1-1.
- [59] Akay, S. S. 2023. İHA Tabanlı 3 Boyutlu Verilere Farklı Perspektiflerde Bakış: İTÜ Ayazağa Kampüsü. *Turkish Journal of Remote Sensing and GIS*, 4(1), 47-63.
- [60] Uluçay, A., Küçük, U. F. 2023. Tarih Öğretiminde Sanal Gerçeklik ve Artırılmış Gerçeklik: Geçmiş Canlandırmak İçin Yeni Yollar. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 5(2), 113-129.
- [61] Hocoğlu, M. M. 2022. Yapı Bilgi Modelleme'den Dijital İkiz'e doğru: akıllı tesis yönetimini etkinleştirme. *Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul*.
- [62] Südor, S. 2021. Dijital Sanatlarda 3d Model Oluşturma Tekniklerinin Kullanımı. *İdil Sanat ve Dil Dergisi*, 10(88), 1757-1779.
- [63] Askar, C., Sternberg, H. 2023. Use of Smartphone Lidar Technology for Low-Cost 3D Building Documentation with iPhone 13 Pro: A Comparative Analysis of Mobile Scanning Applications. *Geomatics*, 3(4), 563-579.
- [64] Mouzakis, C., Ververidis, D., Girao, L. M., Patz, N., Nikolopoulos, S., Kompatsiaris, I. 2021. Holistic requirements analysis for specifying new systems for 3D media production and promotion. *Sustainability*, 13(15), 8155.
- [65] Onyıl, H. İ., & Yılmaz, M. 2022. Web tabanlı mekânsal analizlerin açık kaynak kodlu yazılımlar ile gerçekleştirilmesi. *Geomatik*, 7(1), 52-57.
- [66] Aydın, M., İralı, A. E., Kartoğlu, N. U., Yılmaz, P. Ü., Atılgan, N. 2023. Kültürel Mirasın Tanıtımına ve Korunmasına Yönelik Farkındalığa Odaklı Sayısallaştırma Süreci Eğitimlerinin Etkisinin İncelenmesi: KÜMSA Örneği. 9. Uluslararası Tarih Eğitimi Sempozyumu. 6-8 Eylül, Sakarya, Türkiye
- [67] Özcan, O., Akay, S. S. 2022. Paşabağ Bölgesi Peri Bacalarına Ait İha Tabanlı 3b Verilerin Metaverse Kavramı Kapsamında Değerlendirilmesi. VIII Uzaktan Algılama-CBS Sempozyumu, 17-19 Kasım 2022, Ankara
- [68] Yiğit, A. Y., Uysal, M. 2024, Automatic Crack Detection and Structural Inspection of Cultural Heritage Buildings Using UAV Photogrammetry and Digital Twin Technology. *Journal of Building Engineering*, Article number 109952.

[69] Sketchfab. 2023. Sketchfab WEB sitesi. <https://sketchfab.com/>

Determination of Johnson Cook Strength and Failure Parameters of EN-GJS-400 Spheroidal Graphite Cast Iron

Burak Özcan*¹, Ulvi Şeker²,

*¹Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, ANKARA

²Gazi University, Faculty of Technology, Department of Manufacturing Engineering, ANKARA

(Alınış / Received: 25.07.2024, Kabul / Accepted: 19.08.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.08.2024)

Keywords

EN-GJS-400,
Johnson-Cook,
Split Hopkinson,
Finite Element Analysis

Abstract: In this study, to investigate the mechanical behavior of EN-GJS-400 nodular cast iron material, quasi-static tensile tests were conducted at room temperature and at 300°C, 500°C, and 700°C, along with compression tests at room temperature. To examine the behavior at high deformation rates, Split Hopkinson tests were carried out at four different strain rates, reaching up to approximately 4500/s. To reveal the damage behavior of the materials, tensile tests were conducted with four different notches (R=1.25, 2.5, 5, 10mm). Microstructure experiments and spectral analyses of the materials were performed. Based on the data obtained from the experiments, Johnson-Cook (J-C) material and damage model parameters were calculated. The calculated J-C material and damage parameters were defined in the Abaqus finite element software, and virtual tensile tests were conducted and compared with the actual test data. The actual test data and the tests performed in the computer environment were similar to each other.

EN-GJS-400 Küresel Grafitli Dökme Demir Malzemenin Johnson Cook Malzeme ve Hasar Parametrelerinin Belirlenmesi

Anahtar Kelimeler

EN-GJS-400,
Johnson-Cook,
Split Hopkinson
Sonlu Elemanlar Analizi

Öz: Bu çalışma kapsamında EN-GJS-400 küresel grafitli dökme demir malzemenin mekanik davranışlarını incelemek için oda koşullarında ve 300, 500 ve 700° derece sıcaklıklarda yarı statik çekme ve oda koşullarında basma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yüksek şekil değiştirme hızlarında davranışlarını incelemek için dört farklı şekil değiştirme hızında yaklaşık maksimum 5500/s gerinim hızına kadar Split Hopkinson testleri gerçekleştirilmiştir. Malzemelerin hasar davranışlarını ortaya koyabilmek için 4 farklı çentikte (R=1.25, 2.5, 5, 10mm) çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Malzemelerin mikro yapı deneyleri ve spektral analizleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde elde edilen veriler doğrultusunda Johnson-Cook(J-C) malzeme ve hasar model parametreleri hesaplanmıştır. Hesaplanan JC malzeme ve hasar parametreleri Abaqus sonlu elemanlar yazılımında tanımlanarak çekme testleri sanal ortamda gerçekleştirilmiş ve gerçek test verileriyle karşılaştırılmıştır. Gerçek test verisiyle bilgisayar ortamında gerçekleştirilen testler birbirleriyle benzerlik göstermiştir.

*İlgili Yazar, email: ozcan.burak@outlook.com

1. Introduction

Ram and Gautam (2022)[1] focuses on developing the Johnson-Cook (J-C) material model parameters for Si-Mo-Cr ductile cast iron, which is a promising material for automotive, defense, and aeronautical applications due to its high tensile strength, fracture toughness, and wear resistance. The researchers prepared Si-Mo-Cr ductile cast iron by controlled melting and magnesium treatment, followed by uniaxial tensile tests conducted at different strain rates and temperatures. The study revealed that the material exhibits positive strain rate dependency and that its tensile strength increases with strain rate, while ductility decreases. The J-C parameters, including yield strength (A), strain hardening constant (B), strain hardening exponent (n), strain rate sensitivity coefficient (C), and thermal softening coefficient (m), were determined using standard equations. The findings indicate that the microstructural characteristics, such as nodularity and pearlite content, significantly influence the material's mechanical properties and its performance under varying strain rates and temperatures.

Hellström and Olander (2015)[2] focused on the characterization and modeling of Compacted Graphite Iron (CGI) at a microstructural level using the Johnson-Cook (JC) material model. The study aimed to obtain material parameters that accurately represent the deformation and fracture behavior of CGI, particularly in machining processes. The researchers conducted tensile tests on CGI specimens with various notch geometries and used Digital Image Correlation (DIC) to capture strain fields during testing. Finite Element Analysis (FEA) was employed to calculate stress triaxiality in the fracture zones. The obtained material parameters were optimized using MATLAB to fit the JC hardening and fracture models. The study compared a homogeneous approach, treating CGI as a single-phase material, with a heterogeneous approach that accounts for the distinct phases of pearlite and graphite within CGI. The results indicated that while the JC model is effective, it has limitations in capturing certain fracture behaviors, suggesting the need for further investigation and validation of the parameters obtained.

Ljustina, Larsson, and Fagerström (2014)[3] developed a finite element (FE) based simulation methodology to account for the microstructural characteristics of cast iron, particularly focusing on graphite nodularity and its impact on machinability. The study integrates detailed microstructural data obtained from micrograph images into the FE model, allowing for accurate representation of pearlite and graphite phases within the cast iron. The Johnson-Cook viscoplasticity model was utilized to describe the continuous deformation behavior, and a fracture model was applied to simulate chip formation during machining. The researchers conducted a parametric study to investigate how varying degrees of graphite nodularity affect cutting forces and temperatures. The findings show that the model successfully predicts the influence of microstructure on machinability, with simulations correlating well with experimental results, particularly in terms of cutting force and chip formation.

Keser (2015)[4] calculated the parameters of the Johnson-Cook material model for GJV material and developed the material model through experimental and analytical methods. Data from quasi-static tensile tests conducted at 20°C, 300°C, 400°C, 500°C, and 700°C were used, and SHPB test specimens were prepared to obtain values at high strain rates. Tests were performed at strain rates of 1530, 1550, 2000, and 2200 s⁻¹, and the parameters A, B, C, n, and m were determined. These parameters were made ready for use in orthogonal cutting simulations with SEY, allowing the effects of plastic deformation, strain rate, and temperature changes on stress to be seen in a formula. After determining the A parameter, which corresponds to yield strength, from the tensile test conducted at 200°C and quasi-static conditions, the B and n parameters were also found using the same data. The C parameter was then obtained from the SHPB test conducted at high deformation rates, and finally, the m parameter was derived from static tests conducted at different temperatures. To further improve the results, a compression test was performed at a deformation rate of 1 s⁻¹, and the obtained parameters were refined. The mechanical properties of the material were compared with the Johnson-Cook parameters of Gray Cast Iron and Spheroidal Graphite Cast Iron.

Springer (2012)[5] conducted a comprehensive study to characterize the strength and fracture behavior of Nodular Ductile Iron (NDI) and its underlying ferritic matrix phase, primarily focusing on the Johnson-Cook strength and failure models. The research involved quasistatic and split Hopkinson pressure bar (SHPB) compression tests on NDI and a Fe-Si alloy, which served as a model material for the ferritic matrix. Through these tests, the study determined various Johnson-Cook parameters, such as yield strength, strain hardening coefficients, and strain rate sensitivity, along with failure parameters specific to the NDI. The work also included the development of fracture statistics based on different specimen sizes, which are crucial for initializing simulations of fragmentation events. The study's findings contribute significantly to the understanding of NDI's mechanical properties under different loading conditions and provide essential data for continuum-scale simulations of dynamically loaded NDI components.

Salomonsson and Olofsson (2022)[6] conducted an analysis of localized plastic strain in heterogeneous cast iron microstructures using three-dimensional finite element simulations. The study captured the microstructural features of various cast irons through micro-X-ray tomography, which were then used to generate three-

dimensional finite element models. The research aimed to identify microscopic factors that could lead to fatigue crack initiation in cast iron alloys and to incorporate this knowledge into larger-scale structural simulations. The results indicated that the SGI microstructure exhibited more pronounced localized plastic strains compared to other types of cast iron. Additionally, the study emphasized that three-dimensional representations of microstructures provide more accurate predictions of strain fields than two-dimensional analyses.

Liu et al. (2020)[7] conducted an extensive study on the dynamic behavior and damage characteristics of GJS-450 cast iron under varying strain rates. The researchers performed uni-axial quasi-static and dynamic tensile tests at strain rates ranging from 10^{-4} to 250 s^{-1} , utilizing specimens with different geometries to capture the stress-strain curves and fracture strains of the material. The study introduced a strain rate-dependent plastic flow law based on the Voce model to describe the mechanical behavior of GJS-450 in this strain rate range. Moreover, the existing Bai-Wierzbicki damage model was extended to account for strain rate effects, and the modified models were calibrated using local fracture strain data. The proposed constitutive and damage models were validated through simulations, which showed excellent agreement with experimental results. The study highlights the nonlinear effects of strain rate on the yield stress and fracture strain of GJS-450, demonstrating the applicability of the extended models for predicting the mechanical behavior of cast iron alloys under dynamic loading conditions.

Memhard et al. (2011)[8] developed a material model aimed at predicting the containment safety of turbochargers under high dynamic loading and elevated temperatures. The study focused on the cast iron alloy EN-GJS-400 with nodular graphite, examining its mechanical behavior under various loading conditions, including uniaxial and multiaxial tension, compression, and shear. The researchers characterized the material's deformation and damage behaviors and incorporated these findings into a Johnson-Cook type model, along with an extended failure model to account for different failure mechanisms. The developed material model was validated through numerical simulations of penetration tests and a turbocharger containment test, showing good agreement with experimental data. This model provides a critical tool for reducing the cost and complexity of safety testing in turbocharger development by enabling accurate simulations of material behavior under extreme conditions.

In the literature, various test methods have been employed for different cast iron materials to obtain Johnson-Cook (JC) damage and material models, while in some cases, only the material model has been derived. In certain studies, the obtained parameters were input into finite element-based software to compare the results with experimental data, whereas in others, only the material parameters were determined. Additionally, in some of the studies, the microstructure was examined to investigate its influence on the material properties.

With the advancement of technology, the use of computer software in solving engineering problems has steadily increased. One of the methods employed by these software programs, the Finite Element Method (FEM), is widely used for modeling problems related to statics, strength, fatigue, ballistics, machining, fracture mechanics, and heat transfer. Among the many parameters that must be carefully considered to ensure that the results obtained from these software programs are realistic, one of the most crucial is the selection of an appropriate material and damage model to accurately simulate the mechanical behavior of the material. In this study, the aim is to obtain the Johnson-Cook material and damage parameters for the GJS-400 nodular cast iron and to compare the material parameters obtained with real test data using finite element software.

2. Material and Method

In this section, the properties of the materials used and the methods used within the scope of the study will be explained.

2.1. Material

In this study, EN-GJS-400 nodular cast iron material was used. A spectral analysis was conducted to determine the proportions of the alloying elements, and the alloy composition is presented in Table 1. Microstructural images were captured to identify the microstructure of the material, and these are shown in Figure 1.

Table 1. Nominal composition of EN-GJS-400 Cast Iron %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu
4,23	2,68	0,170	0,0162	0,0089	0,0318	0,110

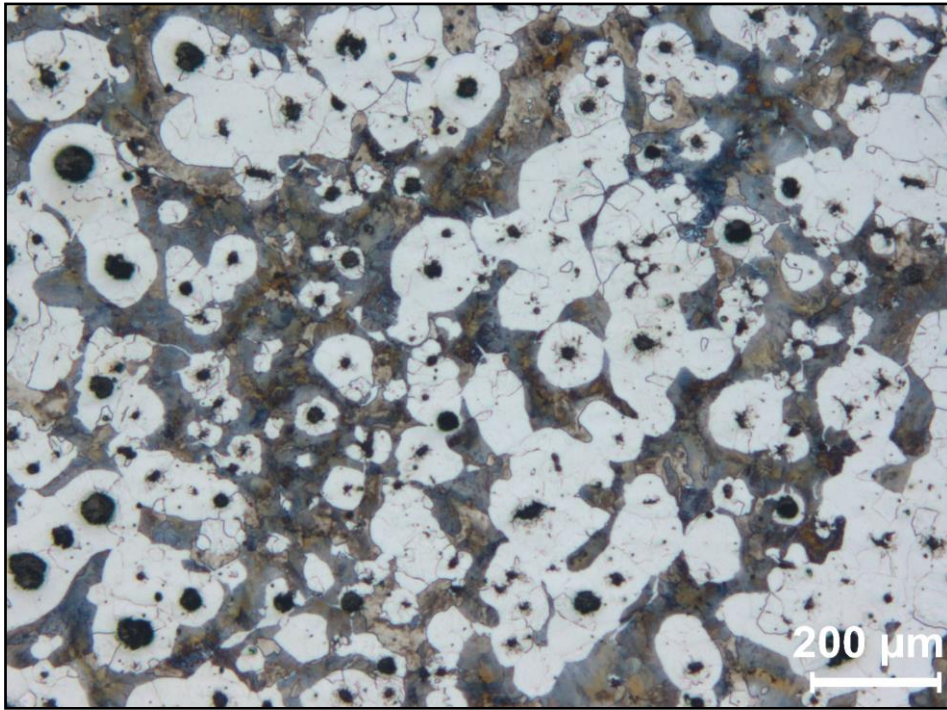


Figure 1. Microstructure of EN-GJS-400.

The technical drawings of the specimens used in the tensile, compression, and Split Hopkinson tests are presented in Figures 2, 3, and 4, respectively.

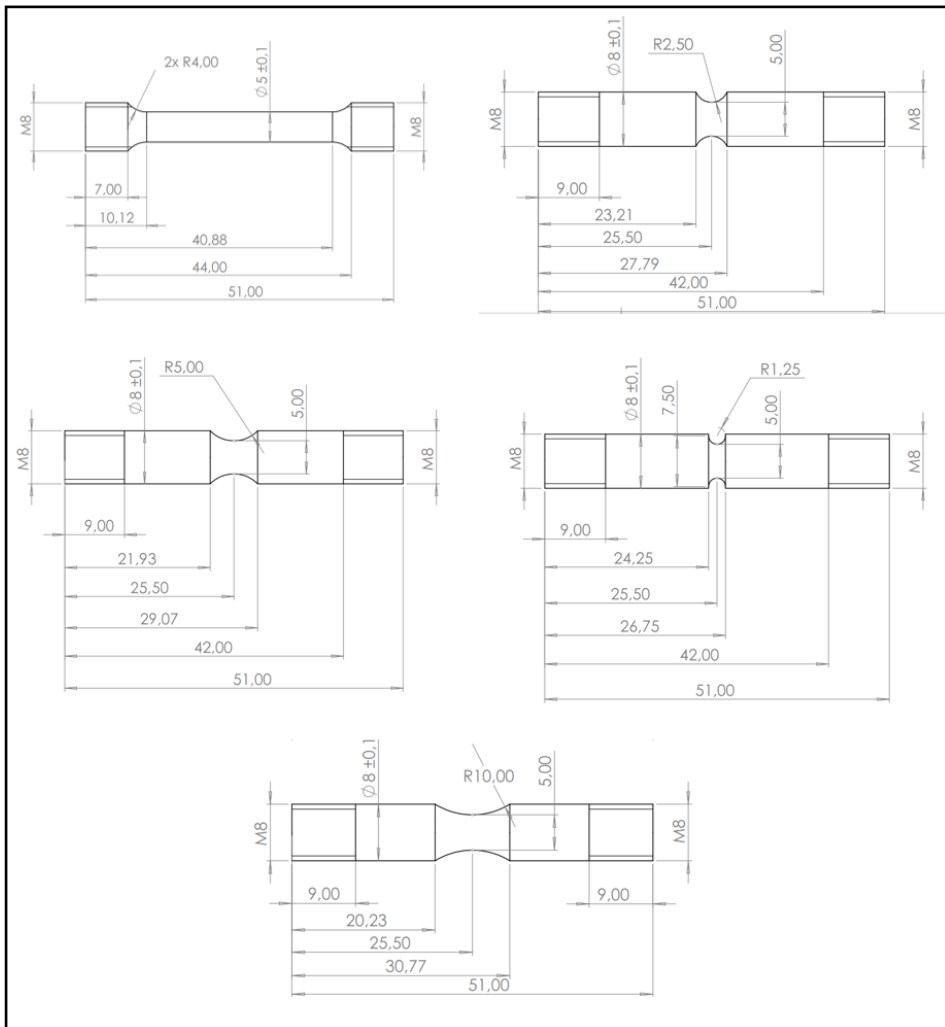


Figure 2. Geometry and dimensions of tensile specimens.

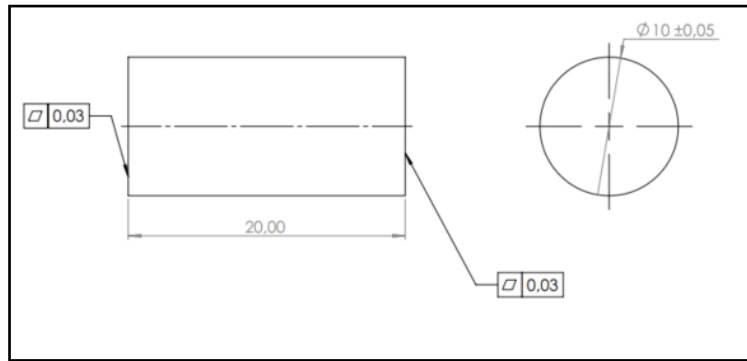


Figure 3. Geometry and dimensions of compressive specimens.

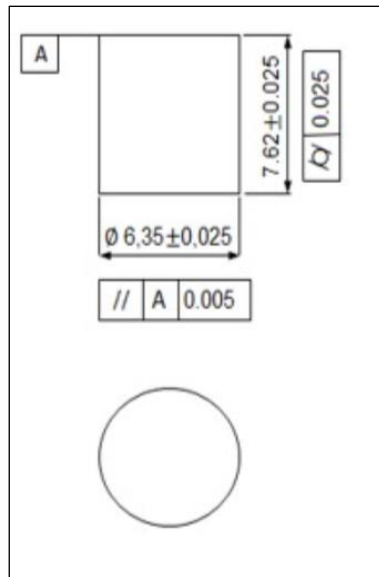


Figure 4. Geometry and dimensions of SHPB specimens.

2.2. Methods

In this section, the methods used will be explained.

2.2.1. Low Strain Rate Experiments

The tensile tests were conducted according to TS EN ISO 6892-1: Method B, with a strain rate of 0.011/s, and the compression tests were performed at tensile and compression speeds of 0.01 mm/s using an MTS Criterion 43 model servo test machine under room conditions. To ensure the repeatability of the experiments, at least three tests were performed for each specimen.

2.2.2. High Strain Rate Experiments

Dynamic compression tests were conducted at four different strain rates under room conditions. The experiments were performed using a Rel brand Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) test setup. Although the strain rates were not identical for each specimen, they were approximately 1100, 2300, 4075, and 5470/s. To ensure the repeatability of the experiments, at least two tests were conducted at each strain rate. A schematic representation of the SHPB test setup is provided in Figure 5.

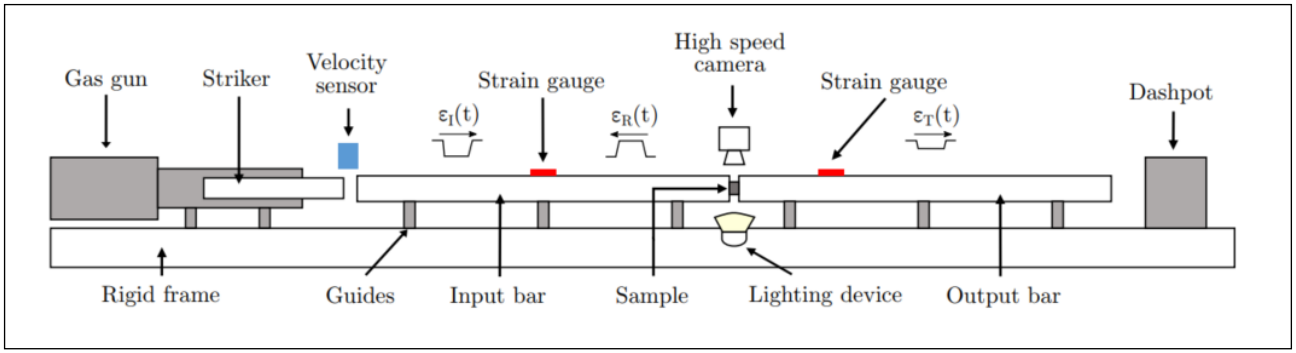


Figure 5. SHPB test schematic.

2.2.3. High Temperature Experiments

High-temperature tensile tests were conducted using an INSTRON 8852 model servo test machine at temperatures of 300°C, 500°C, and 700°C. To ensure the repeatability of the experiments, at least two tests were performed for each specimen.

2.2.3. The Johnson–Cook Material Model

This material model is one of the widely used models to obtain the flow stress of materials as a function of strain, strain rate, and temperature.[9] The flow stress model is expressed as follows:

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*)(1 - T^{*m}) \quad (1)$$

Here, σ represents the equivalent stress, ϵ denotes the strain, A is the yield strength, B is the strain hardening coefficient, n is the strain hardening exponent, C is the strain rate sensitivity coefficient, and m is the stress softening exponent.

$$\left[\dot{\epsilon}^* = \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}, \quad T^* = \frac{T - T_{ref}}{T_m - T_{ref}} \right] \quad (2)$$

Here, $\dot{\epsilon}^*$ represents the dimensionless strain rate T^* is the homologous temperature, T_m is the material's melting temperature, and T denotes the deformation temperature. $\dot{\epsilon}_0$ is the reference strain rate, and T_{ref} is the reference deformation temperature.

To calculate the material coefficients B and n , Equation 1 is rearranged under the reference strain rate and reference temperature conditions, resulting in Equation 3.

$$\sigma = A + B\epsilon^n \quad (3)$$

Taking the natural logarithm of Equation 3, it can be rewritten as shown in Equation 4.

$$\ln(\sigma - A) = \ln B + n \ln \epsilon \quad (4)$$

The value of A can be obtained from the tensile test conducted under the reference strain rate and reference temperature. By inserting the flow stress and strain data under reference deformation conditions into the equation, a linear relationship graph between $\ln(\sigma - A)$ and $\ln \epsilon$ can be constructed. By fitting the data to the equation and using a regression line approach, the material parameters B and n can be determined

$$\sigma = A + B\epsilon^n \quad (5)$$

When the deformation temperature is $T=T_{ref}$, Equation (1) can be edited as shown below [19]:

$$\frac{\sigma}{(A + B\epsilon^n)} = 1 + C \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \quad (6)$$

After determining the values of the material parameters, A, B, and n, the $\frac{\sigma}{(A + B \epsilon^n)} - \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)$ curve is plotted. Linear fitting can be performed using various strain rates with a regression model. Finally, the material constant C can be calculated using the slope of the linear fitting curve.

Equation 1 can be rearranged with respect to the reference strain rate as follows:

$$\sigma = (A + B \epsilon^n)(1 - T^{*m}) \quad (7)$$

Taking the natural logarithm of both sides and rearranging the equation, Equation 7 can be expressed as follows:

$$\ln\left(1 - \frac{\sigma}{A + B \epsilon^n}\right) = m \ln T^* \quad (8)$$

Next, by substituting the material parameters A, B, and n into the equation above and using a regression model, we can obtain the mmm parameter from the graph of the linear fitting curve. [6].

2.2.3. The Johnson-Cook Failure Model

The Johnson-Cook failure model indicates that the fracture strain generally depends on the stress triaxiality ratio, temperature, and strain rate. [10]The Johnson-Cook failure model is shown below.

$$\epsilon_f = \left[D_1 + D_2 \exp\left(D_3 \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}\right)\right) \right] [1 + D_4 \ln(\dot{\epsilon}^*)] [1 + D_5 T^*] \quad (9)$$

Here, ϵ_f is the failure strain, D_1 is the initial failure strain, D_2 is the exponential factor, D_3 is the triaxiality factor, D_4 is the strain rate parameter, and D_5 is the temperature parameter. σ_m is the mean stress, and σ_{eq} is the equivalent stress. The ratio $\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}\right)$ is known as stress triaxiality.

The first bracket in the JC failure model in Equation 9 includes the failure strain, exponential factor, and triaxiality factor (D_1 , D_2 , D_3) respectively. These parameters can be determined by testing unnotched and notched tensile specimens at the reference strain rate and reference temperature. Under reference strain rate and reference temperature, Equation 9 can be written as follows.

$$\epsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)] \quad (10)$$

Using the data from notched and unnotched tensile tests, a fracture strain versus stress triaxiality graph can be generated. By fitting an exponential curve to the points on this graph, the parameters D_1 , D_2 , and D_3 can be obtained.

The strain rate parameter D_4 in the JC failure model can be determined from the failure strains of specimens tested at different strain rates under reference temperature. At the reference temperature, Equation 9 can be expressed as follows:

$$\epsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)] \left[1 + D_4 \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \right] \quad (11)$$

When Equation 11 is rearranged, it can be written as follows:

$$\frac{\epsilon_f}{[D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)]} - 1 = D_4 \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \quad (12)$$

Thus, the D_4 parameter can be obtained by plotting the failure strain versus logarithmic strain rate curve and applying linear curve fitting

The final parameter of the JC failure model, D_5 , can be determined from the failure strains of unnotched specimens tested at different temperatures and the reference strain rate. At the reference strain rate, Equation 9 can be expressed as follows:

$$\epsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)] \left[1 + D_5 \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right) \right] \quad (13)$$

When Equation 13 is rearranged, it can be written as follows:

$$\frac{\epsilon_f}{[D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)]} - 1 = D_5 \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right) \quad (14)$$

Therefore, fitting the above equation to the experimental failure strain versus temperature curve will yield the value of D_5 .

2.2.4. Finite Elements Model

In this study, the Abaqus software package was used as the finite element analysis (FEA) tool. The solid model of the flat tensile test specimen used in the analysis is shown in Figure 6, and the finite element model is depicted in Figure 7. The obtained Johnson-Cook (J-C) material and failure model parameters were defined in the Abaqus software. The mesh model used linear hexahedron elements, consisting of 14,560 elements and 16,905 nodes. The boundary conditions were set by fixing one end of the specimen, while the other end was subjected to tensile loading.

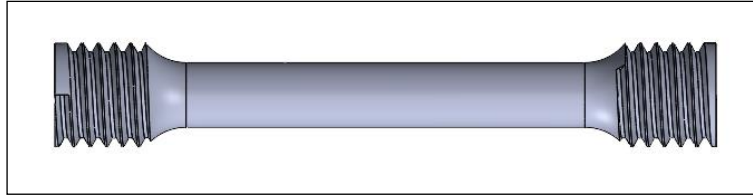


Figure 6. Tensile test specimen.

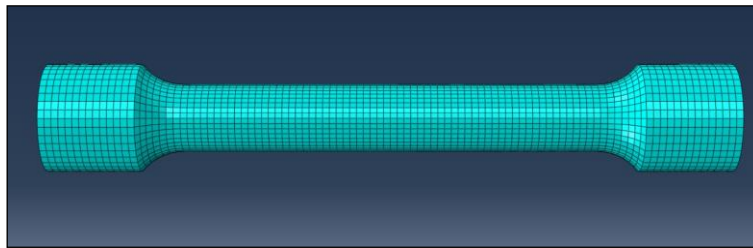
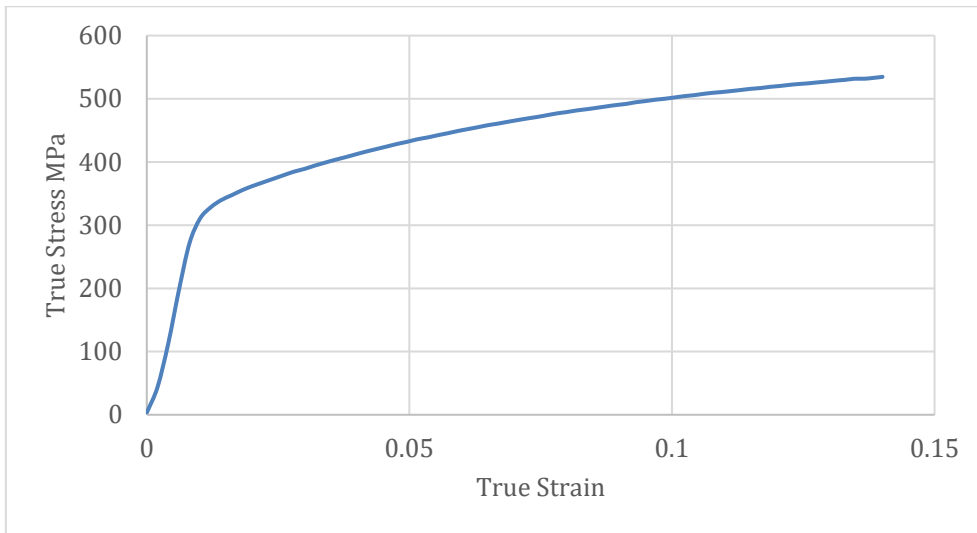


Figure 7. FE mesh model.

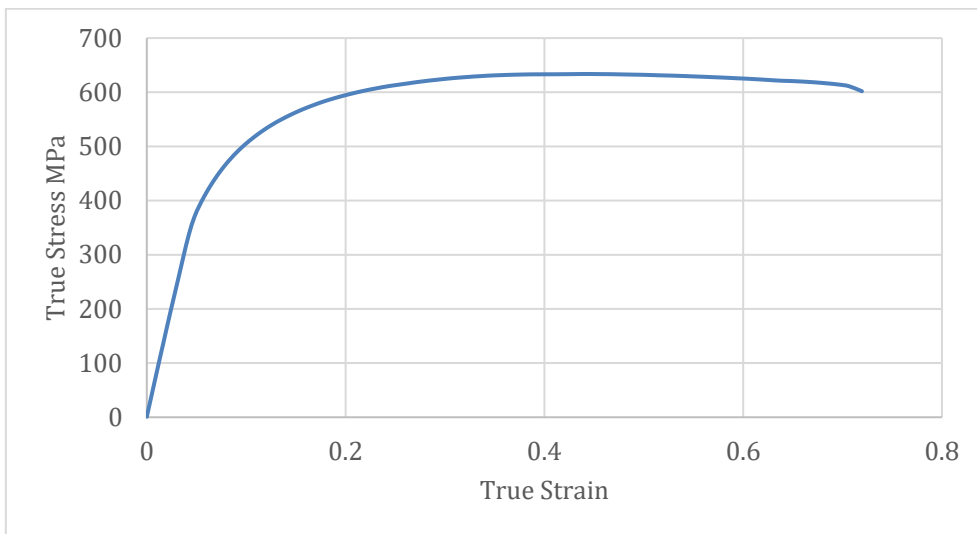
3. Results

3.1. Low Strain Rate Result

The results of the tensile tests conducted at room temperature and low strain rates are presented in Graph 1, while the results of the compression tests are shown in Graph 2. All stress-strain graphs provided in this study represent true stress and true strain. Upon examining both graphs, it is observed that there is no distinct yield point in the quasi-static tests; however, a noticeable strain hardening occurs during the plastic deformation phase. In the tensile tests, the strain hardening continues consistently after the yield region, whereas in the compression tests, a strain softening behavior is observed after the ultimate compressive strength. The yield strength was determined to be 310 MPa from the tensile tests and 420 MPa from the compression tests.

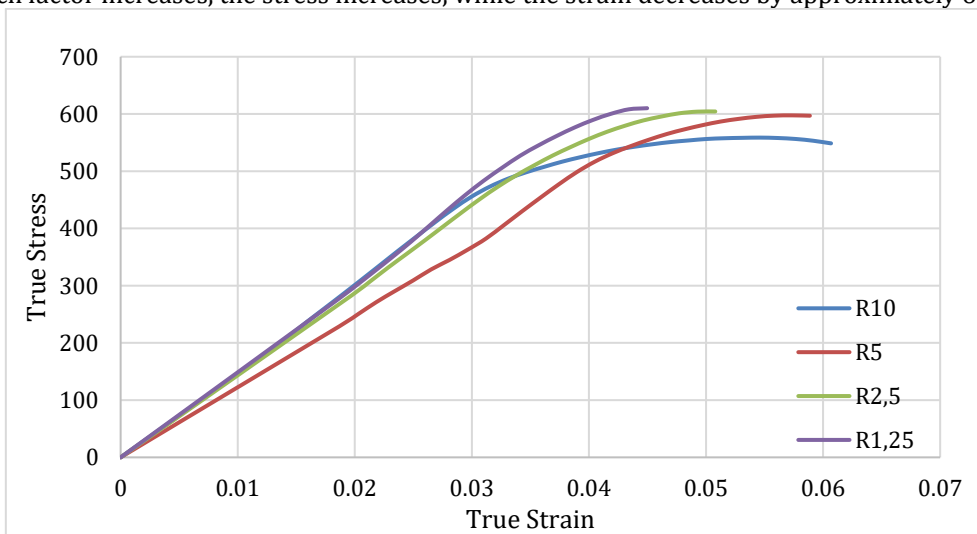


Graph 1. True Stress - True Strain curve for tensile test



Graph 2. True Stress - True Strain curve for compressive test

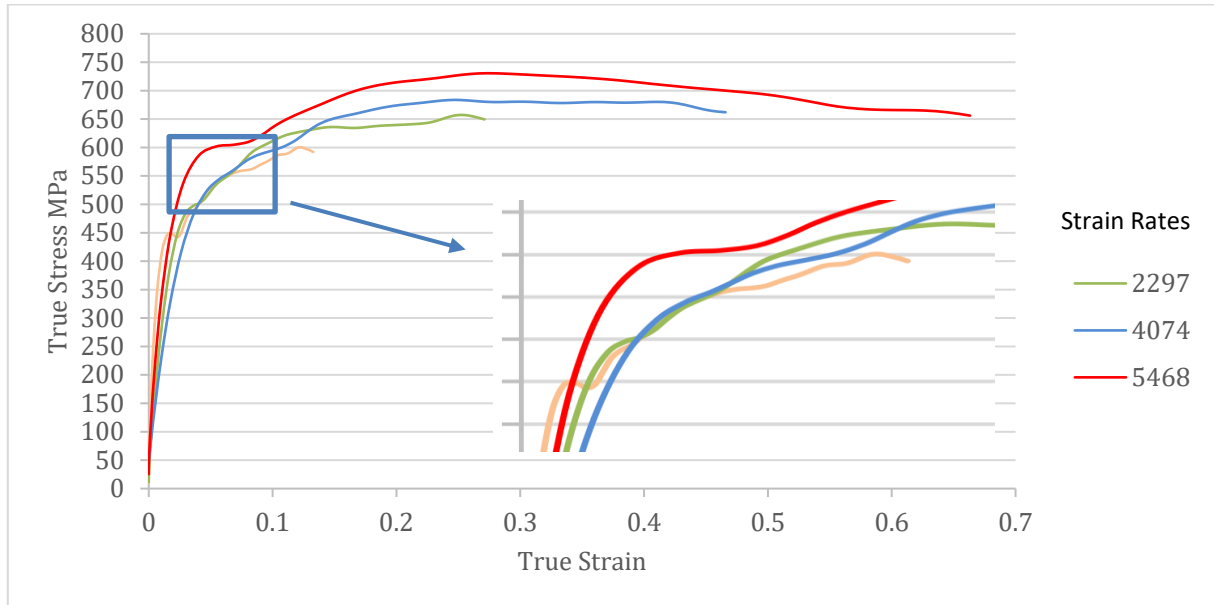
The results of the notched tensile tests conducted at room temperature and low strain rates are presented in Graph 3. As the notch factor increases, the stress increases, while the strain decreases by approximately 65%.



Graph 3. Fracture Strain - Stress Triaxiality for Notched Tensile Test

3.2. High Strain Rate Result

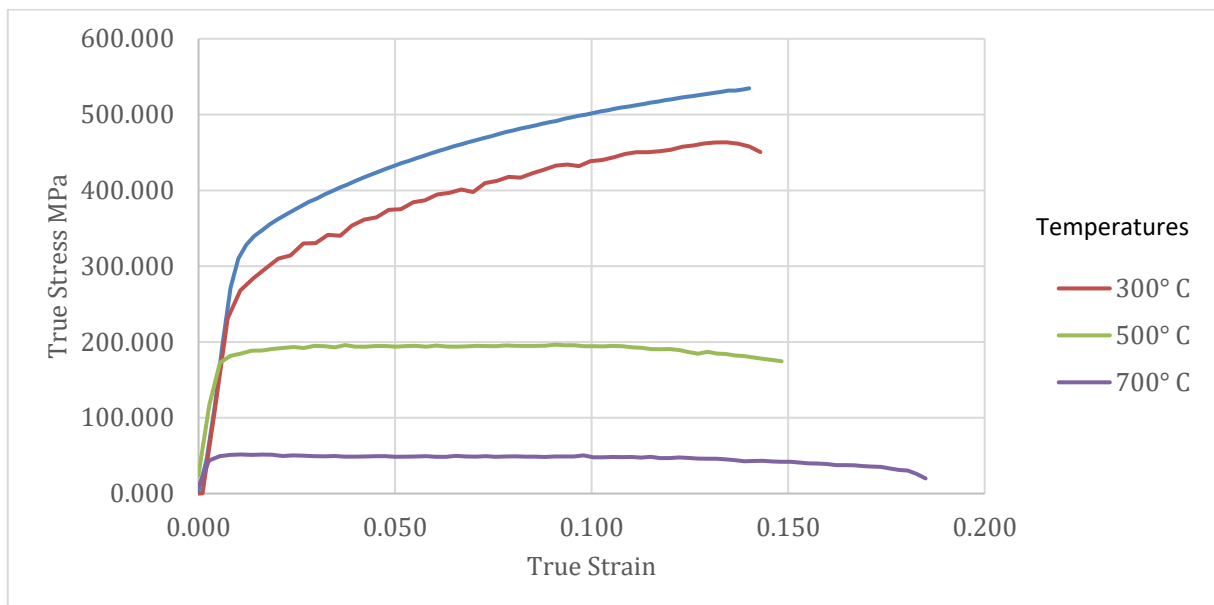
The results of the Split Hopkinson Pressure Bar tests are presented in Graph 4. The tests were conducted at room temperature with strain rates of 1103 s^{-1} , 2297 s^{-1} , 4074 s^{-1} and 5468 s^{-1} . While the yield point was not clearly observable in the quasi-static tensile and compression tests, it became more pronounced in the experiments conducted at high strain rates. Additionally, as the strain rate increased, the material's yield strength, ultimate tensile strength, and the amount of deformation were observed to increase.



Graph 4. True Stress – True Strain curve for High Strain Rate Compressive test

3.3. High Temperature Result

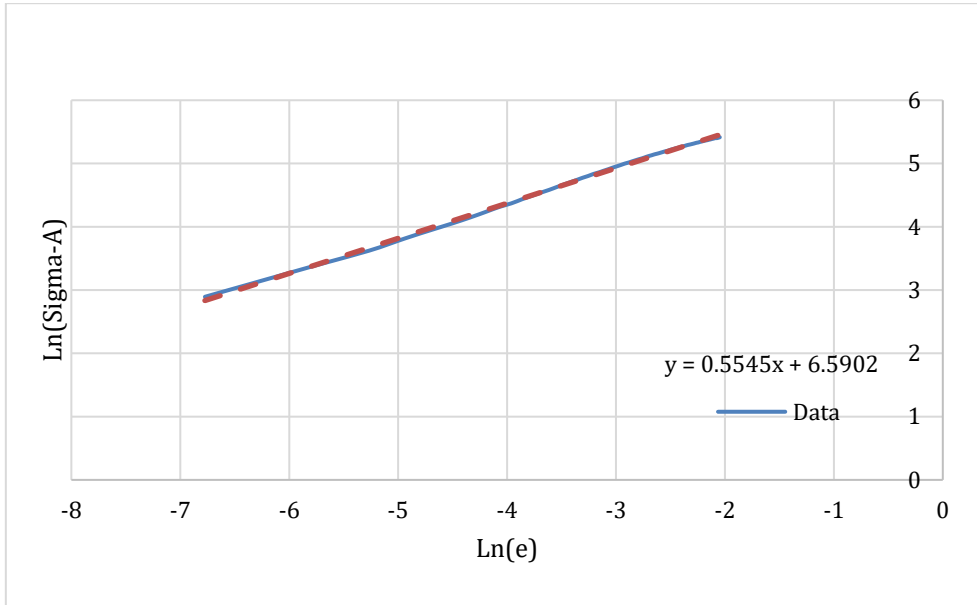
The results of the hot tensile tests conducted at constant strain rates at 300°C , 500°C , and 700°C are presented in Graph 5. The experiments revealed that as the temperature increased, the material's yield strength and ultimate tensile strength decreased. In contrast to the yield and tensile strength, the amount of deformation, and therefore ductility, increased. It was also observed that with increasing temperature, the occurrence of strain hardening gradually diminished.



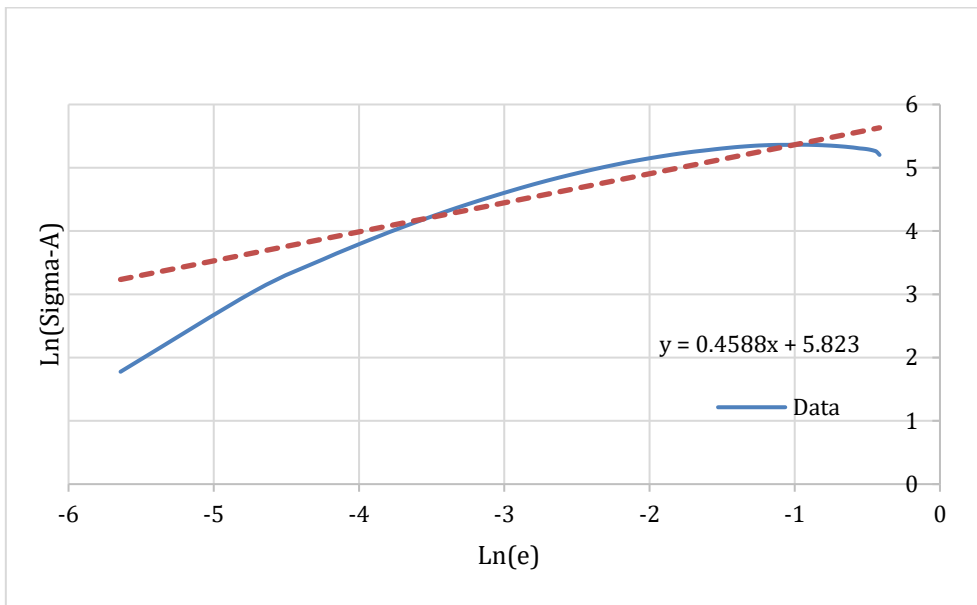
Graph 5. True Stress – True Strain curve for high temperature tensile test

3.4. The Johnson–Cook Material Model

When the data obtained from the tensile test is used with Equation 4, Graph 6 is generated, and when the data from the compression test is used, Graph 7 is obtained. The values in these graphs are fitted using the linear curve fitting method to produce a first-degree equation. The constant term of this equation provides the B coefficient as 6.5902, and the exponent of the coefficient in front of x gives the n value

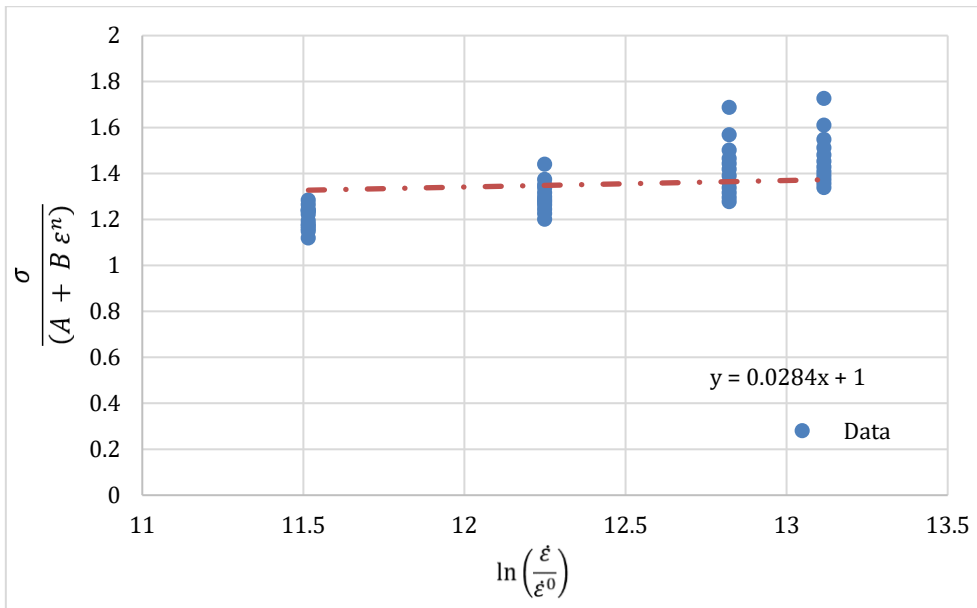


Graph 6. Ln(Sigma-A) vs Ln(e) (Tensile)

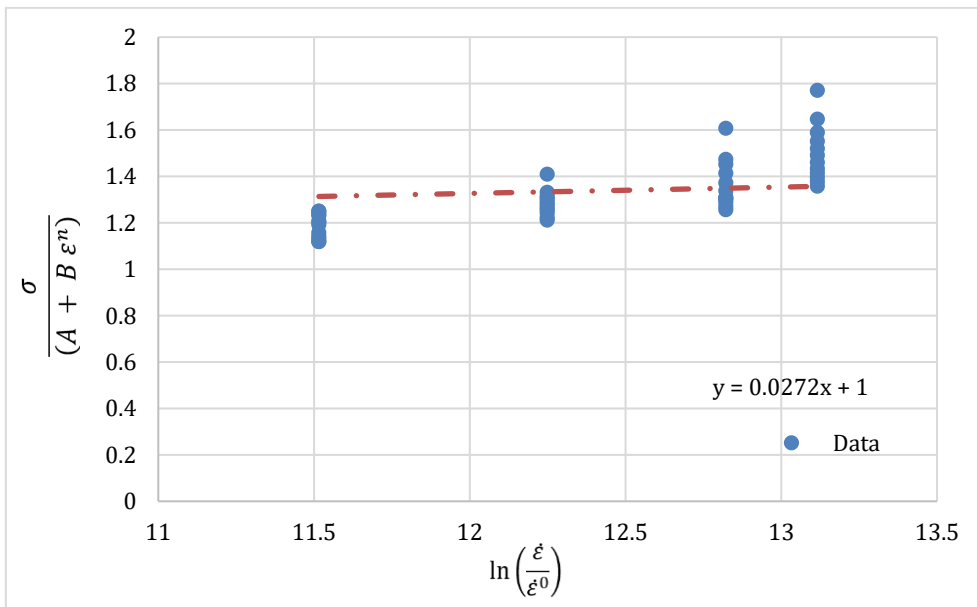


Graph 7. Ln(Sigma-A) vs Ln(e) (Compression)

In the tensile and compression tests conducted so far, the parameters A, B, and n have been determined. Using these parameters and the data obtained from the SHPB tests, Graphs 8 and 9 are generated with the help of Equation 6. The values in these graphs are fitted with a linear curve using the linear curve fitting method. The slope of this curve will provide the value of the coefficient c.

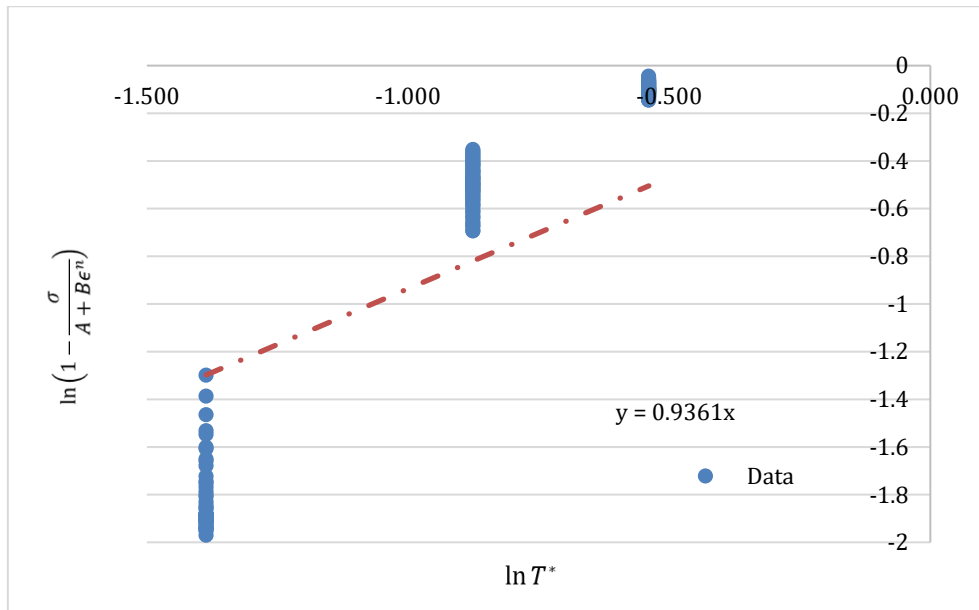


Graph 8. Relationship between Strain Rate and Normalized Stress (Linear Fitting) (Tensile)

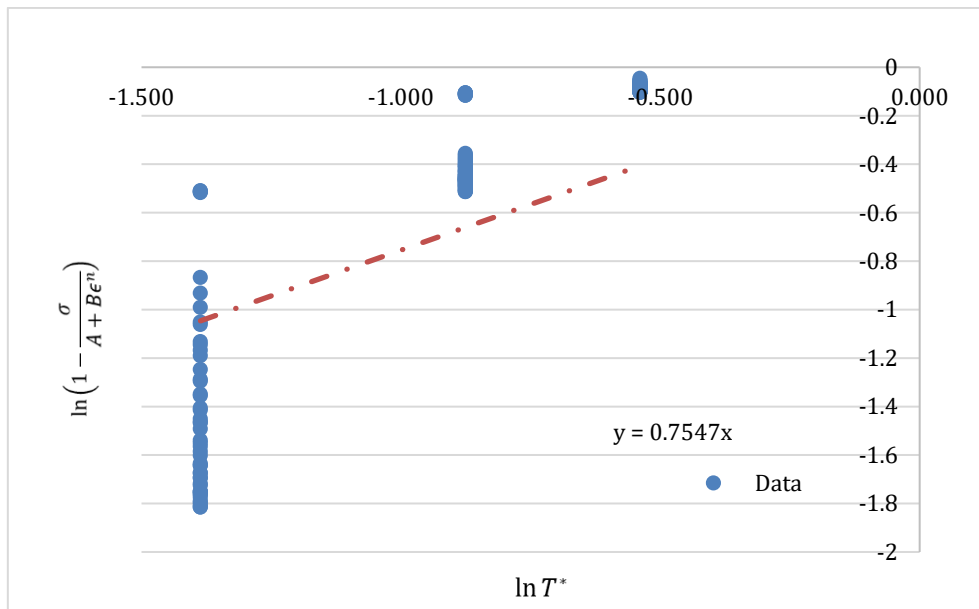


Graph 9. Relationship between Strain Rate and Normalized Stress (Linear Fitting) (Compression)

Using the results from the high-temperature tensile tests and the tensile and compressive tests conducted at room temperature, the parameters A, B, and n are applied in Equation 8 to generate Graph 10 and 11. The values in this graph are fitted using the linear curve fitting method to produce a curve. The slope of this curve provides the m coefficient.



Graph 10. Relationship between $\ln\left(1 - \frac{\sigma}{A+B\epsilon^n}\right)$ and $\ln T^*$ for Tensile

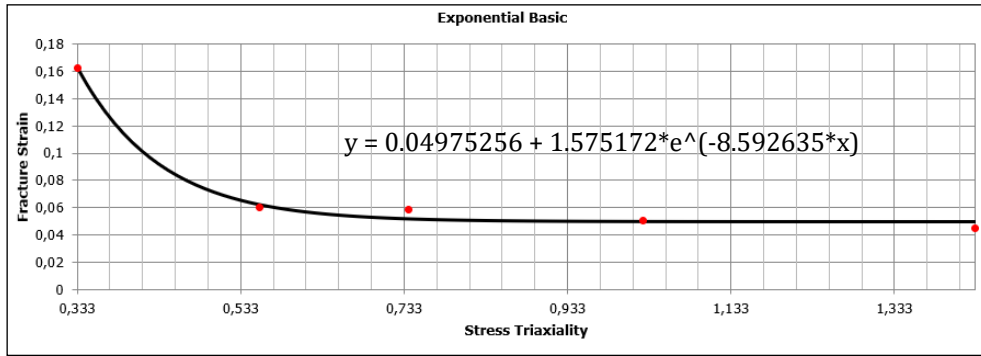


Graph 11. Relationship between $\ln\left(1 - \frac{\sigma}{A+B\epsilon^n}\right)$ and $\ln T^*$ for Compressive

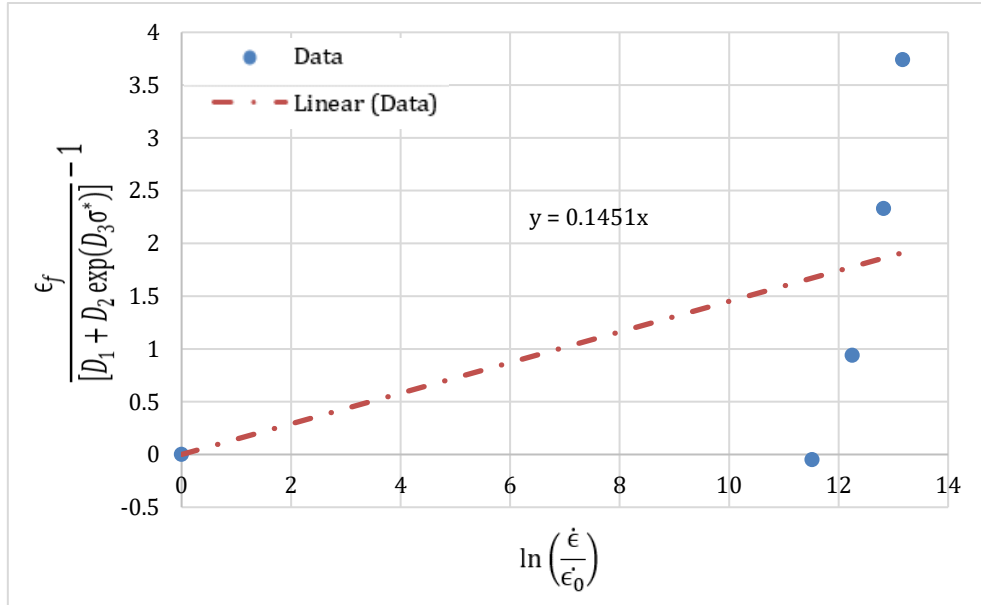
A(MPa)	B(MPa)	n	C	m	
310	728	0,5545	0,0241	0,9361	A, B and n parameters were calculated using tensile test
420	338	0,459	0,0272	0,7547	A, B and n parameters were calculated using compressive test

3.4. The Johnson–Cook Failure Model

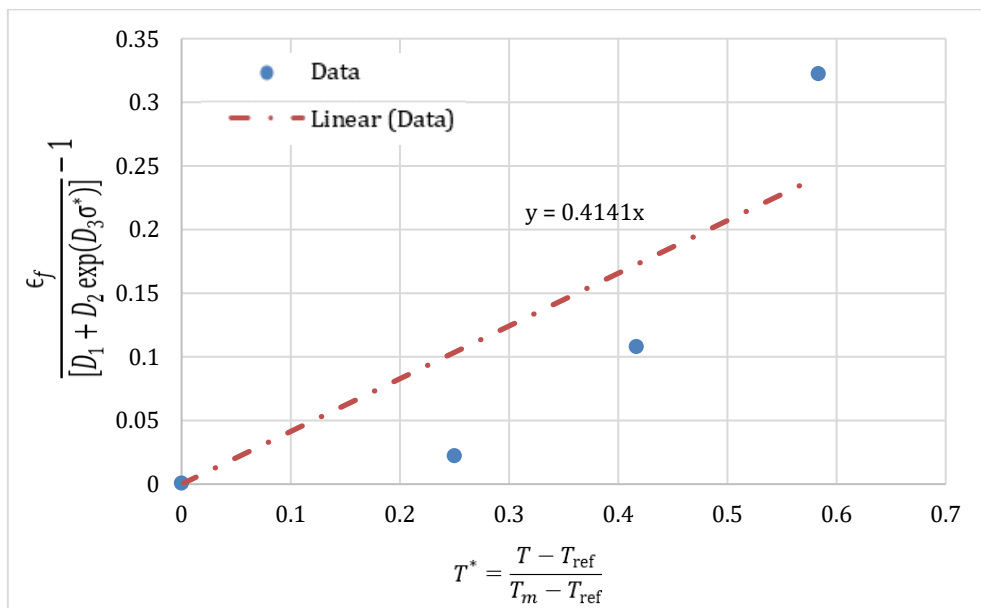
The graph of Fracture Strain versus Stress Triaxiality, obtained using the data from the notched tensile test, is presented in Graph 12. The values in this graph can be fitted using the exponential curve fitting method to derive Equation 10. As a result, the parameters $D1=0.0498$, $D2=1.5752$, and $D3=-8.5926$ are obtained. Using the data from the high-strain-rate SHPB tests and Equation 12, Graph 13 can be generated, from which the $D4$ parameter can be obtained using the linear curve fitting method. Similarly, the data from the high-temperature tensile tests and Equation 14 can be used to generate Graph 14, where the $D5$ parameter is obtained using the linear curve fitting method.



Graph 12. Fracture Strain – Stress Triaxiality for Notched Tensile Test



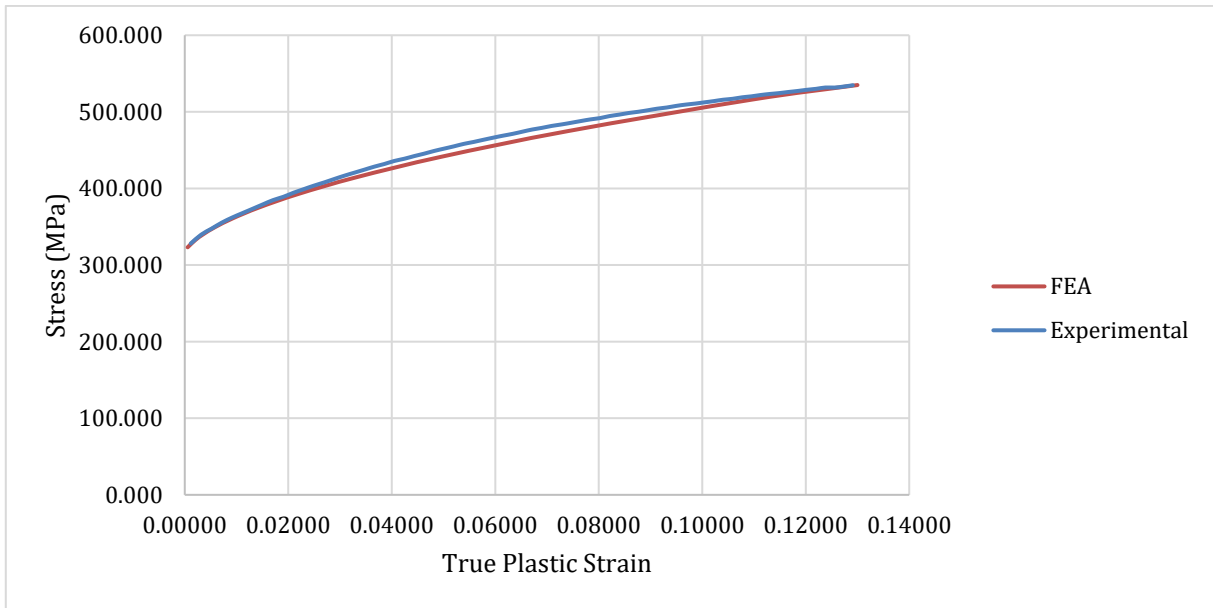
Graph 13. Relationship between $\ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)$ and $\frac{\epsilon_f}{[D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)]} - 1$



Graph 14. Relationship between $\left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)$ and $\frac{\epsilon_f}{[D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)]} - 1$

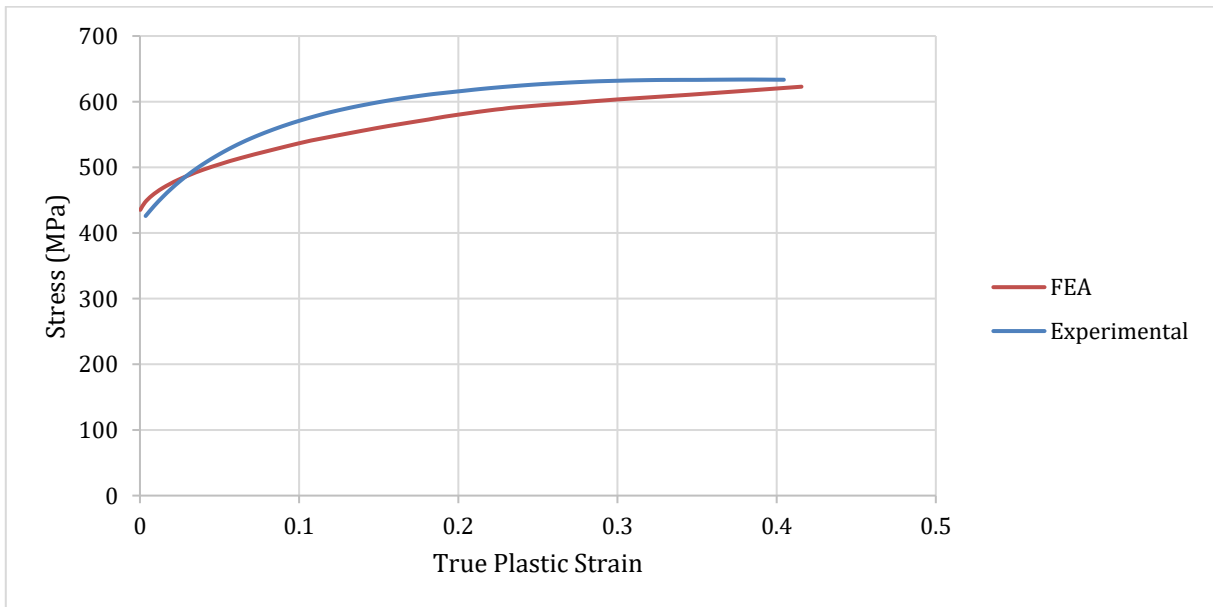
3.5. Finite Element Analysis Result

The tensile test data obtained using the Abaqus software, along with the experimental data, are presented in Graph 15. Upon examining the results, it is observed that the finite element analysis data closely match the experimental results. The maximum difference between the two sets of results is 0.005.



Graph 15. True Stress – True Plastic Strain curve for FEA vs Experimental (Tensile)

The compression test data obtained using finite element analysis, along with the experimental data, are presented in Graph 16. Upon examining the results, it is observed that the finite element analysis data closely match the experimental results. The maximum difference between the two sets of results is 0.063.



Graph 16. True Stress – True Plastic Strain curve for FEA vs Experimental (Compressive)

4. Discussion and Conclusion

In this study, the Johnson-Cook material and damage parameters for the EN-GJS-400 nodular cast iron material were comprehensively determined. The data obtained from tensile and compression tests conducted at low and high strain rates, high-temperature experiments, and Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) tests have provided a detailed understanding of the mechanical behavior and deformation characteristics of this material.

The Johnson-Cook material model parameters (A , B , n , C , m) and damage model parameters ($D1$, $D2$, $D3$, $D4$, $D5$) were calculated. These parameters were integrated into the Abaqus software for finite element analyses, and the virtual tensile and compression tests were found to be consistent with the actual test data. The tensile tests showed a difference of 0.005, while the compression tests showed a difference of 0.063.

The results of this study have helped to understand how the EN-GJS-400 material behaves under high strain rates and elevated temperatures. These findings provide valuable insights that can be used to employ the material more effectively and safely in engineering applications. Future research is recommended to investigate the effects of different cast iron types and alloying elements on such mechanical behaviors.

Acknowledgment

I would like to express my gratitude to Ekstrametal Döküm Izaba ve Mak. San. Tic. Ltd. Şti. for providing the materials used in this study, and to Assoc. Prof. Dr. MURAT AYDIN and Assoc. Prof. Dr. UMUT ÇALIŞKAN for their invaluable support during the execution of the experiments.

References

- [1] Ram, N., & Gautam, V. (2022). Evaluation of Johnson-Cook material model parameters for Si-Mo-Cr ductile cast iron. *Materials Today: Proceedings*, 61, 16-20.
- [2] Hellström, P., & Olander, K. (2012). *Analysis and modeling of properties of Compacted Graphite Iron on a microstructural level* (Master's thesis). Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
- [3] Ljustina, G., Larsson, R., & Fagerström, M. (2014). A FE based machining simulation methodology accounting for cast iron microstructure. *Finite Elements in Analysis and Design*, 80, 1-10.
- [4] Keser, S.(2015).CGI Malzemeye Ait Malzeme Modelinin Deneysel ve AnalitikYolla Geliştirilmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [5] Springer, H. K. (2012). Mechanical Characterization of Nodular Ductile Iron Rep (LLNL-TR-522091). Lawrence Livermore National Laboratory.
- [6] Salomonsson, K., & Olofsson, J. (2017). Analysis of localized plastic strain in heterogeneous cast iron microstructures using 3D finite element simulations. In *4th World Congress on Integrated Computational Materials Engineering (ICME 2017)* (pp. 217-225). Ypsilanti, MI, United States.
- [7] Liu, C., Sun, D., Zhang, X., Andrieux, F., & Gersterc, T. (2024). Extension of flow behaviour and damage models for cast iron alloys with strain rate effect. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 37(61).
- [8] Memhard, D., Andrieux, F., Sun, D.-Z., & Häcker, R. (2011). Development and verification of a material model for prediction of containment safety of exhaust turbochargers. In *8th European LS-DYNA Users Conference 2011*.
- [9] Johnson, G.R. and Cook, W.H. (1983) A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates, and High Temperatures. Proceedings 7th International Symposium on Ballistics, The Hague, 19-21 April 1983, 541-547.
- [10] G. R. Johnson and W. H. Cook, "Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 21, No. 1, 1985, pp. 31-48. [http://dx.doi.org/10.1016/0013-7944\(85\)90052-9](http://dx.doi.org/10.1016/0013-7944(85)90052-9)

Ağırlıklı CNN Topluluğu Tabanlı Kolorektal Kanser Tespiti

Mustafa Yurdakul^{*1}, Şakir Taşdemir²,

^{*1} Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği, KIRIKKALE
² Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği, KONYA

(Alınış / Received: 16.04.2024, Kabul / Accepted: 16.07.2024**, Online Yayınlanma / Published Online:
30.08.2024)

Anahtar Kelimeler

Ağırlıklı Topluluk
Öğrenmesi
Derin Öğrenme
Kolorektal Kanser
Konvolüsyonel Sinir Ağı

Öz: Kolorektal Kanser(KKR), dünya çapında yaygın ve potansiyel olarak ölümcül bir hastalıktır. Erken ve doğru teşhis, teşhisin zaman alması, insan hatalarının olasılığı ve uzman doktor eksikliği nedeniyle zor bir süreçtir. Bu çalışmada, tıbbi görüntülerden kolorektal kanserin teşhisini basitleştirmek ve hızlandırmak için derin öğrenme algoritmaları kullanılmıştır. Çeşitli KKR evrelerini içeren Enteroskop Biyopsi Histopatolojik H&E(EBHI) görüntü veri seti kullanıldı. Çeşitli önceden eğitilmiş Evrişimli Sinir Ağı modelleri, görüntüleri iyi huylu veya kötü huylu olarak sınıflandırmak için kullanıldı. Ayrıca, sınıflandırma doğruluğunu artırmak için üç en iyi model ağırlıklı topluluk yöntemiyle birleştirildi. Deneysel sonuçlar, ağırlıklı topluluk yönteminin sınıflandırma performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir.

Colorectal Cancer Detection Based on Weighted Ensemble of CNNs

Keywords

Colorectal Cancer
Convolutional
Network
Deep Learning
Weighted Ensemble,

Abstract: Colorectal Cancer(CRC) is a common and potentially deadly disease around the world. Early and correct diagnosis can be a challenge due to the time Neuralit takes, the possibility of human mistakes, and the lack of specialized doctors. In this study, deep learning algorithms, a type of machine learning algorithms, were used to simplify and speed up the diagnosis of CRC from medical images. In this study, we used Enteroscope Biopsy Histopathological H&E Image dataset, which contains various stages of CRC. Various pre-trained Convolutional Neural Network models were used to classify images into two groups: malignant or benign. Moreover three best models combined using weighted ensemble method to improve the accuracy of classification. The experimental results show that weighted ensemble method significantly improves classification performance.

*İlgili Yazar: myyurdakul1@gmail.com

1. Introduction

Colorectal Cancer (CRC) occurs as a result of the development of malignant tumors in the large intestine. CRC ranks third in global cancer prevalence and is the second major cause of cancer-related deaths[1]. The vast majority of cases are detected in western countries, and the number of cases is increasing every year[2]. In these cases, one out of every three patients loses their life[3]. All cancer types related to rectal, colorectal and colon cancer are accepted as colorectal cancer[4]. Histopathological imaging of the intestine is one of the methods used in the diagnosis of CRC[3]. In diagnosing of CRC, pathologists analyze digital images stained with Hematoxylin and Eosin (H&E)[5]. Pathologists locate the area of the lesion and then use microscopes to magnify and examine it in detail. However, diagnosing based on histopathological images can be challenging. Pathologists have to examine a large amount of data, which causes a time-consuming process. Pathologists can make mistakes due to fatigue, lack of attention or knowledge. Also, different pathologists may have different opinions and experiences, which can lead to inconsistent diagnoses. Furthermore, the number of pathologists globally is insufficient [6] the training period for an expert pathologist exceeds a decade[7]. For all these reasons, there is a need for fast, accurate and reliable solutions for the diagnosis of CRC. It is possible to make detailed analyzes on images with computer aided systems. Deep learning algorithms has a successful outputs in the detection of breast[8], skin[9], brain[10] and gastrointestinal[11] cancers. Based on these studies, using deep learning for CRC detection can be an effective approach. In this study, the publicly available Enteroscope Biopsy Histopathological H&E Image dataset (EBHI) is used. EBHI contains images obtained with an electron microscope, pertaining to various stages of CRC.

Using microscopic images, a classification process has been performed to categorize them into two groups: malignant and benign. Various pretrained CNN models was used to classify. The performance of the models was optimized using transfer learning and fine-tuning techniques. In addition to all these, the best three models selected according to the performances of the models were used with the weighted ensemble method to increase the performance. Proposed approach combines the strengths of the models and balances their weaknesses, thus providing a more accurate and reliable classification for CRC diagnosis. The remaining sections of the article are structured as follows: Section 2 provides a discussion on related studies. Section 3 describes the materials and methods used, including the dataset and the proposed classification system. Section 4 presents the results and analysis of the study. Section 5 discusses the findings and implications of the research. Section 6 concludes the article, summarizing the key findings.

2. Related Works

In recent years, deep learning methods have been extensively used in the medical field[9, 12, 13]. In particular, Convolutional Neural Networks (CNN), a deep learning algorithm, contributes to the disease diagnosis process by automating medical image analysis. Successful results have been achieved in numerous studies, such as breast[8], skin[9], brain[10], gastrointestinal[11] cancers and pneumonia detection [14]. Additionally, numerous studies have been achieved at the detection of Colorectal Cancer.

Akbari et al. (2018)[15] proposed a novel CNN model for the detection of polyps, a leading cause of colon cancer. In the proposed model, the size of model was reduced by using binary weights and kernels, thereby enhancing the model's compatibility with medical devices. An accuracy value of 90.28% was achieved on the Asu Mayo Test clinical dataset.

Ponzio et al. (2018)[16] proposed the VGG16 model to distinguish Adenocarcinomas from healthy tissue and benign lesions. An accuracy rate of 90% was achieved with the VGG16 model. Additionally, transfer learning was implemented using the VGG16 model trained on ImageNet data and accuracy rate of 96% was achieved.

Poudel et al. (2020)[17] developed a new robust model for the detection of colorectal diseases with an efficient dilation method in CNNs. In the study that used the KVASIR dataset and classified five different categories (Adenocarcinoma, Adenoma, Crohn's, Ulcerative colitis, Normal), an accuracy of 95.7% was achieved.

Sarwinda et al. (2021) [18] proposed ResNet architectures to classify colon gland images into benign and malignant categories. The images were converted to grayscale and then applied the CLAHE algorithm. Experimental studies showed that ResNet-18 and ResNet-50 models resulted in an accuracy of 88% and 85%, respectively.

Su et al. (2022) [19] performed feature extraction on histopathology images for the classification of colon and colorectal diseases. In the study, various machine learning algorithms (XGBoost, SVM, RF, LDA, MLP, and LightGBM) were used to classify the extracted features from histopathology images. XGBoost achieved the highest accuracy rate of 99%.

Naga et al. (2023) [20] proposed a study for the classification of colon and lung adenocarcinomas along with squamous cell carcinomas using digital histopathology images.

In the study, feature extraction was performed on histopathology images using the PCANet model. The extracted features were optimized with the Rider Optimization algorithm and classified using the Extreme Learning Machine. They achieved an accuracy rate of 99.72% on Kvasir dataset.

Kumar et al. (2023) [21] proposed a new CNN model called CRCCN-Net for the automatic diagnosis of colorectal cancer. The model is designed to be lightweight and less complex. The CRCCN-Net model has significantly fewer parameters (3.76M) compared to Xception, InceptionResNetV2, DenseNet121, and VGG16 models. It achieved an accuracy of 93.50% on the CRCCN-Net dataset and 96.26% on the NCT-CRC-HE-100K dataset for colorectal cancer. The model outperformed Xception, InceptionResNetV2, DenseNet121, and VGG16 models, demonstrating better results.

Hu et al. (2023) [22] used various machine learning algorithms and deep learning techniques for the classification of histopathological images into benign and malignant categories using the publicly available dataset called EBHI. The classical machine learning algorithms achieved a maximum accuracy rate of 76.02%, deep learning technique was achieved a significantly higher accuracy rate of 95.37%.

Yengeç et al.[23] proposed a Clinical Decision Support System (CDSS) for the detection of adenomatous polyps in colon histopathology images. They employed the ConvNeXt architecture for the classification of histopathological images. Evaluating the proposed method on a custom dataset with over 10,000 colon histopathology images, they achieved a classification accuracy of 95%. Furthermore, on the EBHI and UniToPatho datasets, they achieved classification accuracies of 91.1% and 90%, respectively.

Although there are many studies in the existing literature, computer-aided colorectal cancer detection system is an active field of study. Although EBHI dataset to be used in the study is quite comprehensive and useful, it has been observed that a limited number of studies have been carried out. In this context, in the light of the literature, two different approaches are tested on the EBHI dataset in this study. In the first approach, various well-known CNN models are tested on the EBHI dataset. In the second approach, the three most successful CNN models are used with the weighted voting ensemble method weighted by the grid search algorithm.

3. Material And Methods

The images of Normal, Polyp, Low-Grade IN, High-Grade IN, and Adenocarcinoma in the EBHI dataset were categorized into benign and malignant classes. Subsequently, the data was divided into three parts with an 80% training, 10% testing, and 10% validation split, and online data augmentation techniques were applied. The data was trained using various architectures of different sizes and transfer learning with models pre-trained on ImageNet. The best three models were combined using weighted ensemble method. The details of the dataset, architectures used, and data augmentation processes are described following sections of the study. Fig. 1 shows the schematic diagram of the proposed study.

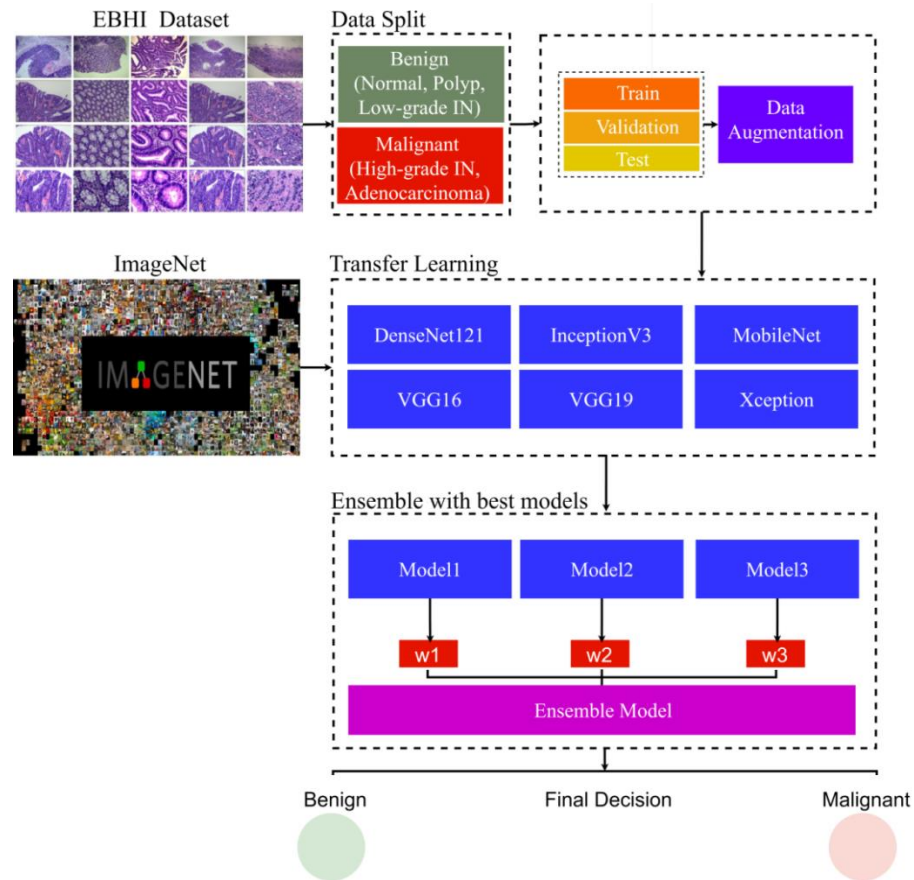


Fig. 1. Schematic Diagram of Proposed Study

4. Dataset

EBHI [22] dataset is a public dataset comprising a total of 5532 electron microscopy images, which includes five stages of colorectal cancer (CRC): Normal, Polyp, Low-Grade Intraepithelial Neoplasia (Low-Grade IN), High-Grade Intraepithelial Neoplasia (High-Grade IN), and Adenocarcinoma. Normal cells in the dataset are characterized by regular morphology and a low mitotic rate. Polyp exhibits elevated and low nuclear division rates, forming raised lesions in the intestinal mucosa. Low-Grade IN is characterized by significant changes in cell morphology and arrangement, representing precursor lesions. High-Grade IN is distinguished by severe nuclear atypia and a high mitotic rate. Adenocarcinoma represents malignant tumors with irregular lumen distribution, infiltrative growth, and a high nucleoplasmic ratio. The dataset includes four magnification levels: 40x, 100x, 200x, and 400x. The distribution of the dataset according to CRC stages and magnification levels is shown in Table 1.

Table 1. Dataset Distribution by CRC Stages and Magnification Levels[22]

Magnification	40x	100x	200x	400x	Total
Normal	17	29	61	79	186
Polyp	119	165	254	304	842
Low-grade IN	204	341	603	660	1808
High-grade IN	47	80	130	161	418

Adenocarcinoma	205	471	790	812	2278
Total	592	1086	1838	2016	5532

Fig. 2 shows sample images from different magnification levels of CRC stages in the EBHI dataset.

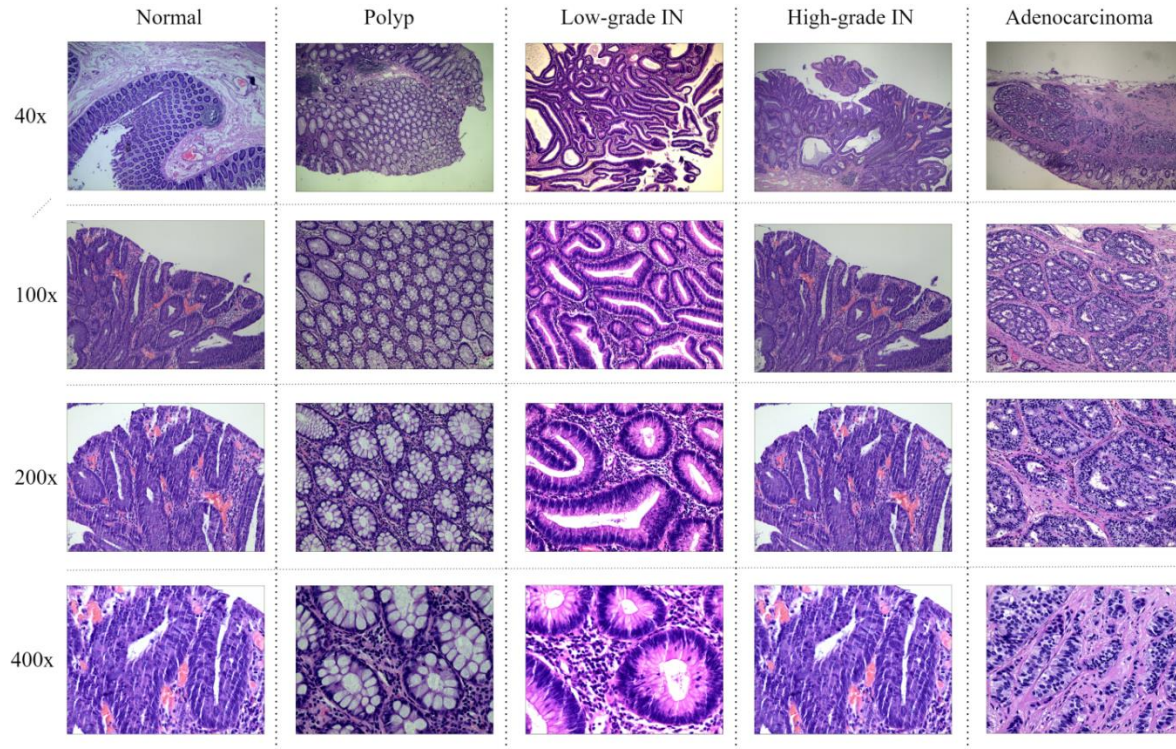


Fig. 2. Sample Images of CRC Stages at Different Magnification Levels and categories in the EBHI Dataset. The five classes corresponding to CRC stages are divided into two main categories according to the Medical Classification method: Benign (Normal, Polyp, and Low-Grade IN) and Malignant (High-Grade IN and Adenocarcinoma). The numerical distribution of the dataset based on the main categories and magnification levels is presented in Table 2.

Table 2. Dataset Distribution by Type And Magnification Levels

Type	40x	100x	200x	400x	Total
Benign	340	535	918	1043	2836
Malignant	252	551	920	973	2696
Total	592	1086	1838	2016	5532

In this study, classification was performed on 200x and 400x magnification levels, taking into account the distribution of the dataset. Figure 3 presents the t-SNE plot of malignant and benign images at 200x and 400x magnification levels. t-SNE [24] is a visualization method used to represent high-dimensional data by mapping similar data points closer together, making it easier to interpret the data visually.

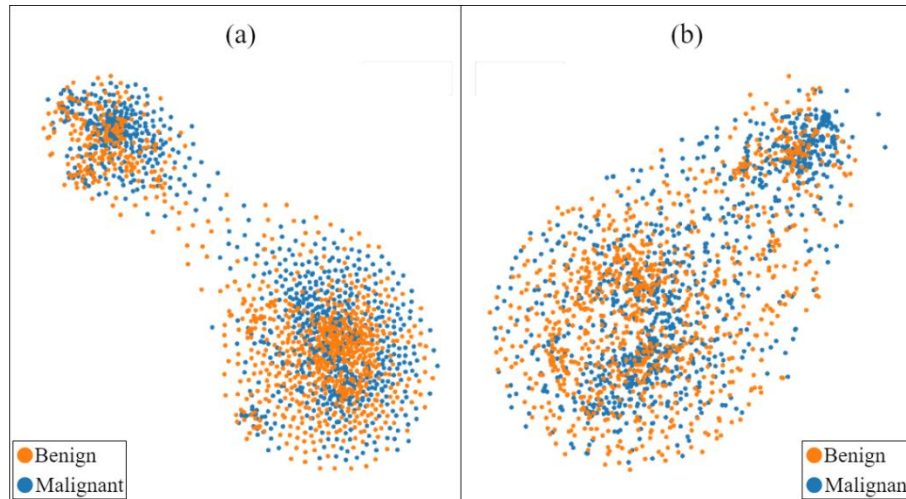


Fig. 3. Dataset visualization in a two dimensional space of benign and malignant images: (a) 200x and (b) 400x

5. Data Augmentation

The performance of deep learning algorithms is directly related to the size of the training data [25]. In cases where the data is insufficient, data augmentation techniques can be applied to increase the number of images in the dataset. In this study, online data augmentation techniques were employed. The parameters of data augmentation methods used in the study are shown in Table 3.

Table 3. Data Augmentation Parameters

Rotation	Width Shift	Height Shift	Shear	Zoom
0.8	0.3	0.6	0.5	0.2

6. Convolutional Neural Networks

CNNs are a special deep learning algorithms that used for image analysis tasks. CNNs achieved successful outputs in various fields such as farm[25, 26], medical[27, 28] and education[29]. CNNs consist of three main components: convolutional, pooling, and fully connected layers [30-32]. The convolutional layer applies filters to the input image in order to extract relevant features[33]. The pooling layer is used for dimensionality reduction, to make the model run faster and reduce computational complexity. In the fully connected layer, the classification process is performed based on the neural network structure. Various architectures have been proposed using the three main components.

Within the study, several well-known and high-performing CNN models were used; DenseNet121 [34], InceptionV3 [35], MobileNet[36], VGG16[37], VGG19 [37], and Xception [38].

DenseNet121

DenseNet [34] was proposed by Huang et al. in 2016. The DenseNet model utilizes features from previous layers by establishing direct connections between each layer and all preceding layers. The DenseNet-121 architecture, consists of 4 dense blocks, 3 transition layers, and a total of 121 layers.

InceptionV3

InceptionV3 [35], is a network with multiple Inception modules. These modules enhance the network's capacity for generalization and adaptability to different scales.

MobileNet

MobileNet [36], is a 2017 model designed for mobile devices. It reduces network parameters and complexity by using depthwise separable convolutions.

Visual Geometry Group(VGG)

VGG [37], was developed at Oxford University in 2015. It has a deeper and more homogeneous structure than other popular CNN architectures. The VGG16 and VGG19 models consist of 16 and 19 convolutional layers, respectively, with filter sizes typically set as 3x3.

Xception

Xception[38] proposed by Chollet in 2017, is inspired by the Inception V3 architecture. The key innovation introduced in Xception is the inverse usage of depthwise separable convolution modules that modification resulted in improved performance compared to Inception V3 on the ImageNet dataset. The Xception model consists of a total of 14 modules and 36 convolutional layers.

In this study, various CNN models of different sizes, including DenseNet121, InceptionV3, MobileNet, VGG16, VGG19, and Xception, were used for image classification tasks. These models are pre-trained on the ImageNet dataset, enabling them to extract more general features. The classifier block at the last layer of models was removed, and a new classifier layer was added, facilitating transfer learning. The CNN models were trained with a batch size of 32 and an SGD optimizer for 100 epochs.

7. Ensemble Learning

The ensemble method is an approach that aims to create a more powerful and robust model by strategically combining base models[39]. In this study, we have employed the weighted ensemble method. The weighted ensemble method combines different models, with each model given a weight according to its contribution[27]. This method enhances the prominence of better models and reduces the influence of those with poor performance. Pretrained models (DenseNet121, InceptionV3, MobileNet, VGG16, VGG19, and Xception) were trained on the training dataset. Each model's performance was evaluated with the test dataset. Regarding their performance, the best three models were combined using the weighted ensemble

method. The weights of the models, ensuring a total sum of one, were determined through the grid search technique.

8. Evaluation metrics

Classification performance consists of a series of metrics used to measure how accurately a model performs the classification task. In binary classification, TP (True Positive) denotes the count of correctly classified positive samples, TN (True Negative) represents the count of correctly classified negative samples, FP (False Positive) signifies the count of falsely classified positive samples, and FN (False Negative) indicates the count of falsely classified negative samples[40].

Based on TP, TN, FP, and FN values, several metrics such as accuracy, precision, recall (sensitivity), F1 score, and AUC can be calculated to assess the classification performance[40].

The mathematical formulas for these performance evaluation metrics are provided in Equations 1-4.

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

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

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

$$F1\ Score = 2 * \frac{Precision*Recall}{Precision+Recall} \quad (4)$$

9. Results

In this study, binary classification(benign and malignant) was performed on images from the EBHI dataset with 200x and 400x magnification ratios. . Pretrained models (DenseNet121, InceptionV3, MobileNet, VGG16, VGG19, and Xception) were trained on the training dataset. The graphs illustrating the accuracy and loss values during the training process, based on the training and validation data, are shown in Figure 4 and Figure 5 for the 200x magnification ratio, and in Figure 6 and Figure 7 for the 400x magnification ratio. When Figure 4,5,6 and 7 are analyzed, there is a significant difference between the train accuracy and validation accuracy at 200x and 400x magnification, which shows that the models are not overfitting. However, VGG19 experienced fluctuations in validation accuracy and loss value, indicating that the model's prediction on unseen data is worse than the other models.

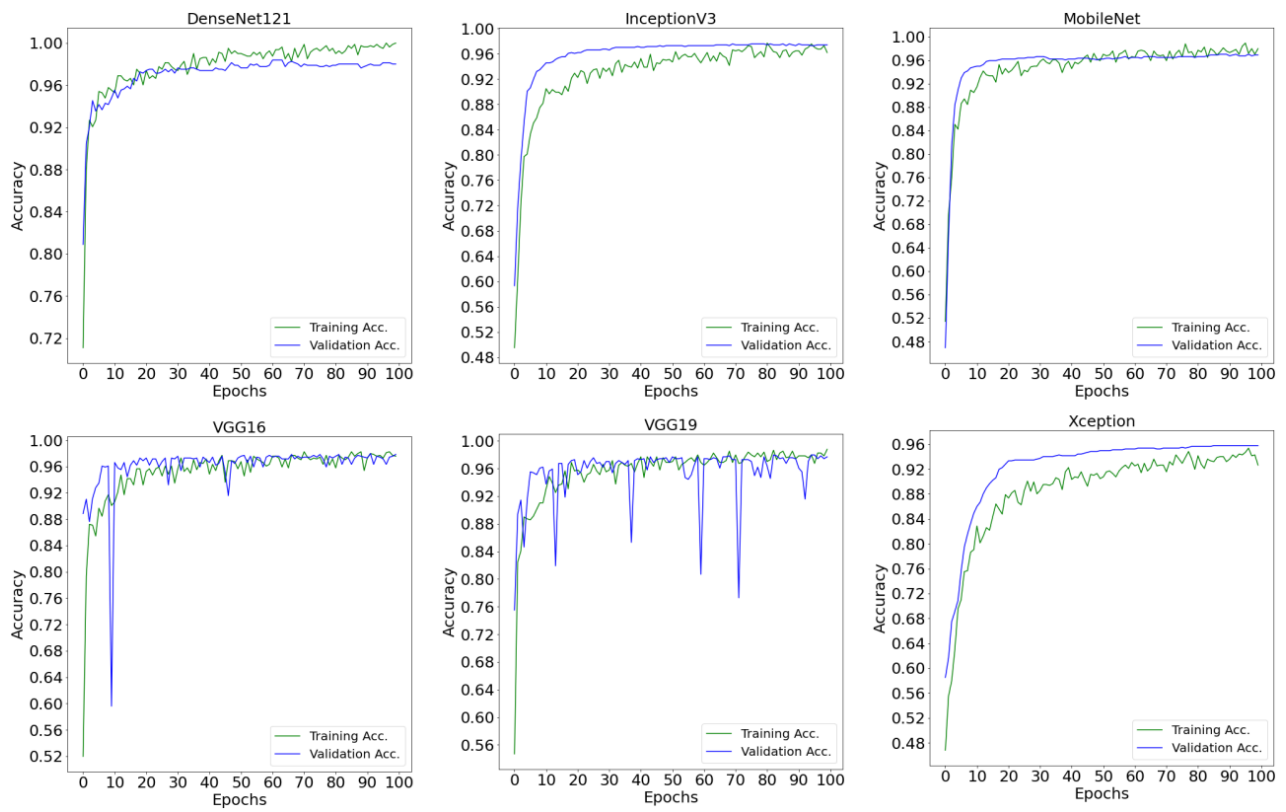


Fig. 4. Mini-batch accuracy plots for models at 200x magnification

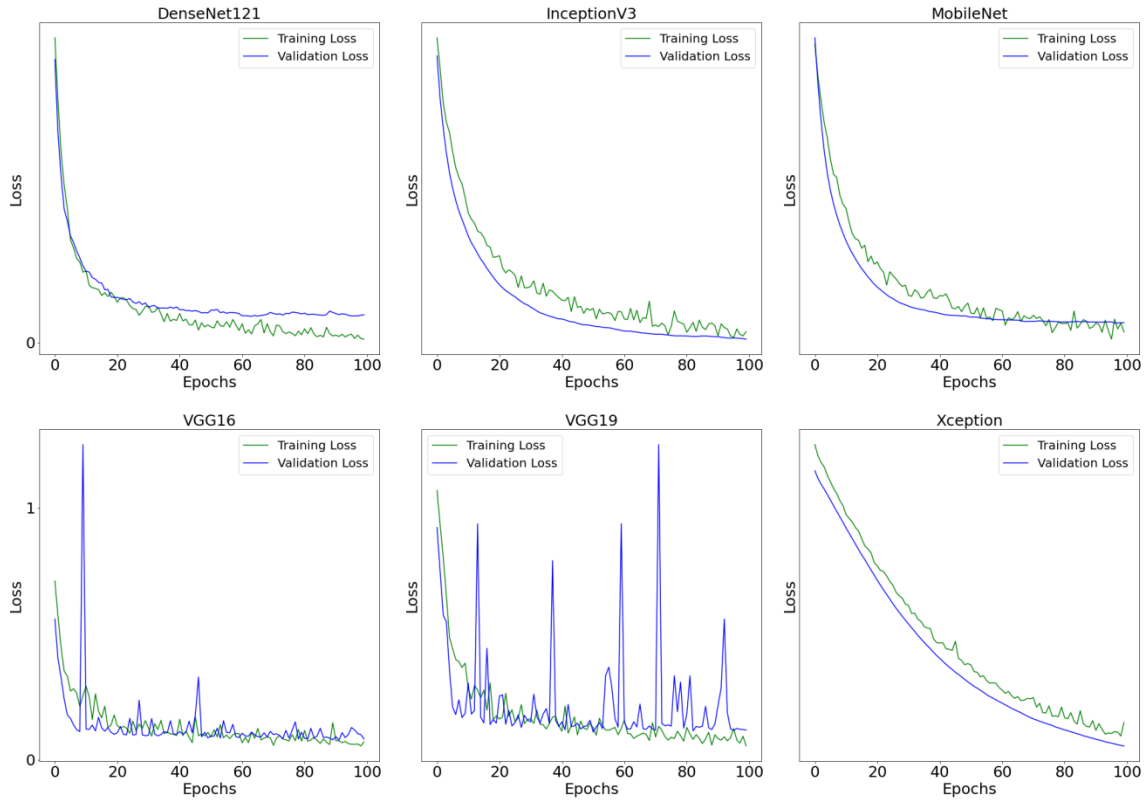


Fig. 5. Mini-batch loss plots for models at 200x magnification

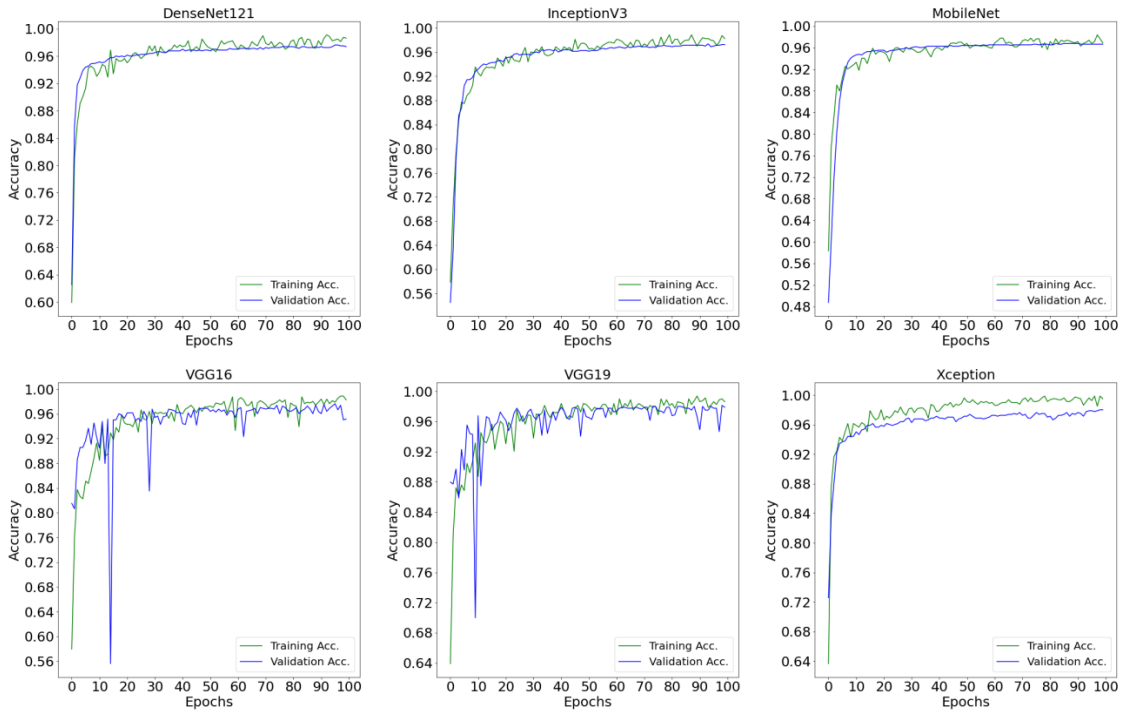


Fig. 6. Mini-batch accuracy plots for models at 400x magnification

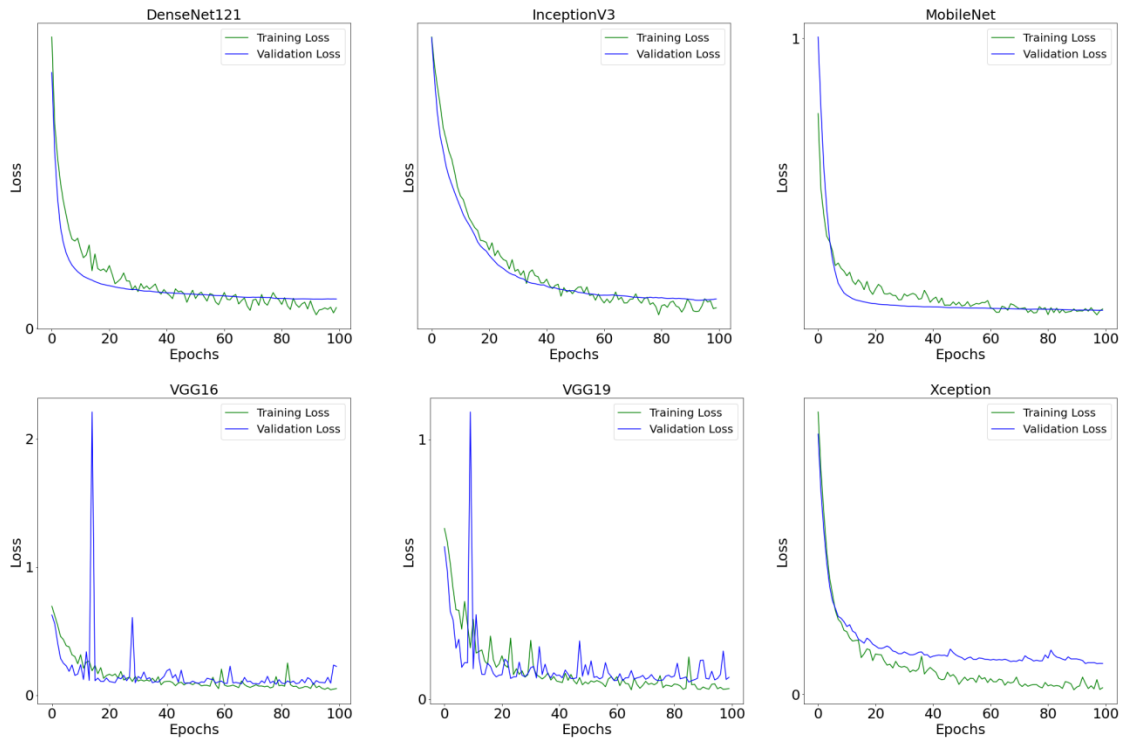


Fig. 7. Mini-batch loss plots for models at 400x magnification

According to the graphs, it can be seen that the difference in accuracy and loss values between the training and validation data is minimal. So the models did not overfit the training dataset. Performance of each model was calculated using a confusion matrix. The confusion matrices for the models, categorized by magnification ratios, are shown in Figure 8 and Figure 9.

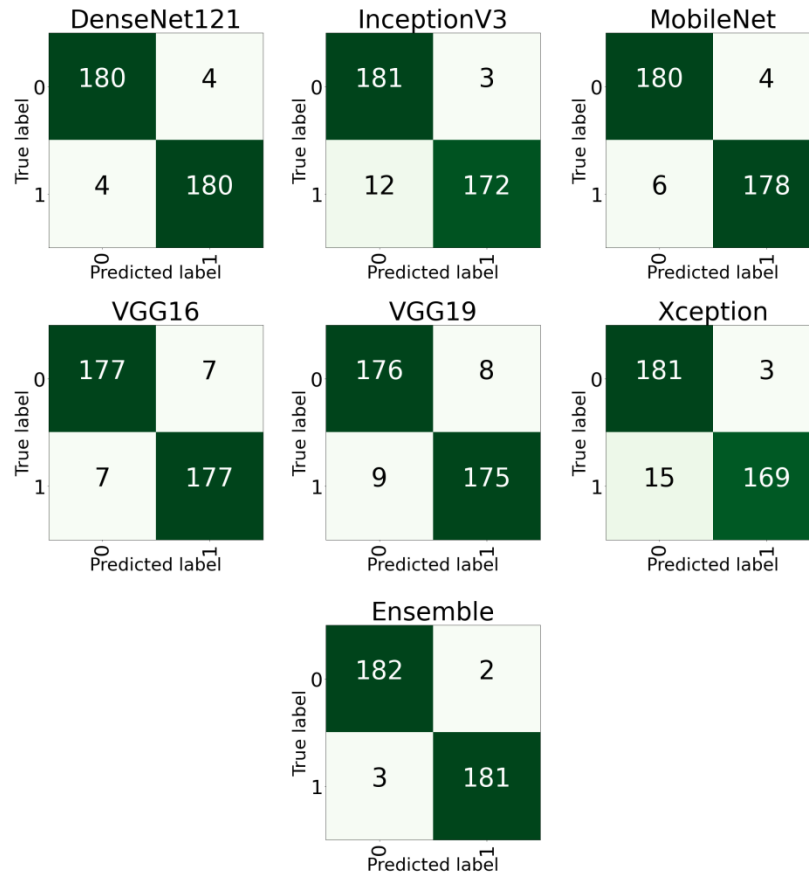


Fig. 8. Model Confusion Matrices at 200x Magnification(0:Malignant,1:Benign)

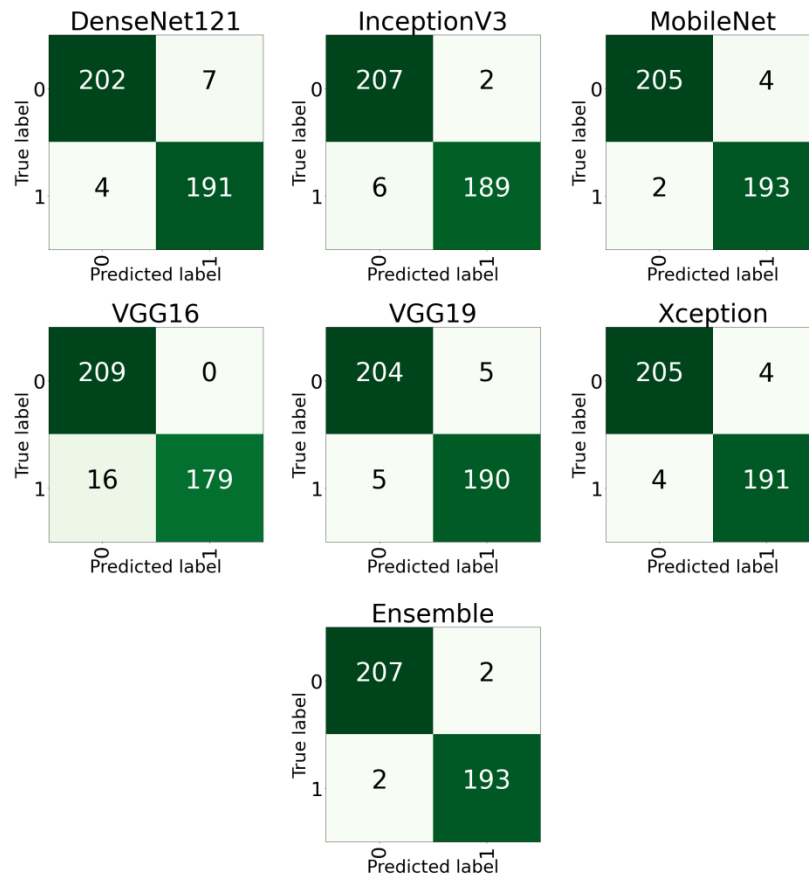


Fig. 9. Model Confusion Matrices at 400x Magnification

The performance of CNN models and the ensemble method is presented in Table 4 and Table 5, respectively, for the 200x and 400x magnification ratios. Among the models at the 200x magnification ratio, DenseNet121, MobileNet, and VGG16 achieved higher accuracy values compared to the other models. The models obtained accuracy rates of 0.9782, 0.9728, and 0.9619, respectively. Hence, these three models were combined using the weighted ensemble method to perform the final classification. On the other hand, for the 400x magnification ratio, MobileNet, Inception-V3, and Xception models achieved the highest accuracy rates. MobileNet performed the best with an accuracy rate of 0.9851, followed by Inception-V3 and Xception with accuracy rates of 0.9801. These three models were also combined using the weighted ensemble method for the final classification. With the weighted ensemble method, the accuracy value increased to 0.9864 for the 200x magnification ratio and 0.9901 for the 400x magnification ratio.

Table 4. Classification Results of Models at 200x Magnification on EBHI Dataset

Model	Acc.	Category	Precision	Recall	F1	AUC
Score						
DenseNet121	0.9782	Benign	0.9783	0.9783	0.9783	0.9782
		Malignant	0.9783	0.9783	0.9783	
Inception-V3	0.9592	Benign	0.9378	0.9837	0.9602	0.9592
		Malignant	0.9829	0.9348	0.9582	
MobileNet	0.9728	Benign	0.9677	0.9783	0.9730	0.9728
		Malignant	0.9780	0.9674	0.9727	
VGG16	0.9619	Benign	0.9620	0.9620	0.9620	0.9619
		Malignant	0.9620	0.9620	0.9620	
VGG19	0.9538	Benign	0.9514	0.9565	0.9539	0.9538
		Malignant	0.9563	0.9511	0.9537	
Xception	0.9510	Benign	0.9235	0.9837	0.9526	0.9510
		Malignant	0.9826	0.9185	0.9494	
Ensemble	0.9864	Benign	0.9838	0.9891	0.9864	0.9864
		Malignant	0.9891	0.9837	0.9864	

Table 5. Classification Results of Models at 400x Magnification on EBHI Dataset

Model	Acc.	Category	Precision	Recall	F1	AUC
Score						
DenseNet121	0.9727	Benign	0.9806	0.9665	0.9735	0.9729
		Malignant	0.9646	0.9795	0.9720	
Inception-V3	0.9801	Benign	0.9718	0.9665	0.9810	0.9798
		Malignant	0.9895	0.9692	0.9793	
MobileNet	0.9851	Benign	0.9903	0.9809	0.9856	0.9853
		Malignant	0.9797	0.9897	0.9847	
VGG16	0.9603	Benign	0.9289	1.0000	0.9631	0.9589
		Malignant	1.0000	0.9179	0.9572	
VGG19	0.9752	Benign	0.9761	0.9761	0.9761	0.9752
		Malignant	0.9744	0.9744	0.9744	
Xception	0.9801	Benign	0.9809	0.9809	0.9809	0.9801
		Malignant	0.9795	0.9795	0.9795	
Ensemble	0.9901	Benign	0.9904	0.9904	0.9904	0.9900
		Malignant	0.9897	0.9897	0.9897	

In conclusion, different deep learning models and the weighted ensemble method were employed in this study to classify tumors in histopathology images with varying magnification ratios. The highest performance was achieved with the DenseNet121, MobileNet, and VGG16 models for the 200x magnification ratio, and the MobileNet, Inception-V3, and Xception models for the 400x magnification ratio. The combination of these models using the weighted ensemble method resulted in higher accuracy rates.

10. Discussion

The experimental results are compared with other successful studies in the literature. Table 6 illustrates the comparison with previous studies on the EBHI dataset. Hu et al. [21] achieved an accuracy of 0.9537 for the 200x magnification ratio. In the study by Yengec et al. [32], a binary classification was performed without specifying the magnification level, and an accuracy rate of 0.911 was achieved. In comparison with these studies, our proposed model achieved accuracy rates of 0.9864 for the 200x magnification ratio and 0.9901 for the 400x magnification ratio. Our results indicate a higher performance compared to the outcomes of previous studies.

Table 6. Performance Comparison with previous works on EBHI Dataset

Study	Magnification	Accuracy	Category	Precision	Recall	F1 Score	AUC
Hu et al.[22]	200x	0.9537	Benign	0.944	0.965	0.954	-
			Malignant	0.964	0.943	0.953	
Yengec et al.[23]	-	0.911	Binary	0.8874	0.9436	0.9146	-
Proposed Model	200x	0.9864	Benign	0.9838	0.9891	0.9864	
			Malignant	0.9891	0.9837	0.9864	0.9864
	400x	0.9901	Benign	0.9904	0.9904	0.9904	0.9900
			Malignant	0.9897	0.9897	0.9897	

11. Conclusion

In this study, deep learning models and the weighted ensemble method were used for binary classification of tumors in histopathology images as benign and malignant, on images with different magnification ratios. Binary classification was conducted using various pre-trained CNN models and the transfer learning method. Highest accuracy rates were achieved for 200x and 400x magnification ratios, respectively, in the DenseNet121, MobileNet, and VGG16 models for 200x; and the MobileNet, Inception-V3, and Xception models for 400x. Combining the best models with weighted ensemble, the accuracy value increased to 0.9864 for the 200x magnification ratio and to 0.9901 for the 400x magnification ratio. The results of this study demonstrate

that high performance can be achieved in the classification of tumors in histopathology images through the use of various deep learning models and ensemble methods.

Declarations

Data availability

My manuscript has associated data in a data repository

Conflict of Interests

The authors declare that they have no conflict of interest.

REFERENCES

- [1] Keum, N. and E. Giovannucci, *Global burden of colorectal cancer: emerging trends, risk factors and prevention strategies*. Nature reviews Gastroenterology & hepatology, 2019. **16**(12): p. 713-732.
- [2] Mármol, I., et al., *Colorectal carcinoma: a general overview and future perspectives in colorectal cancer*. International journal of molecular sciences, 2017. **18**(1): p. 197.
- [3] Świdarska, M., et al., *The diagnostics of colorectal cancer*. Contemporary Oncology/Współczesna Onkologia, 2014. **18**(1): p. 1-6.
- [4] Pamudurthy, V., N. Lodhia, and V.J. Konda. *Advances in endoscopy for colorectal polyp detection and classification*. in *Baylor University Medical Center Proceedings*. 2020. Taylor & Francis.
- [5] Wang, K.-S., et al., *Accurate diagnosis of colorectal cancer based on histopathology images using artificial intelligence*. BMC medicine, 2021. **19**(1): p. 1-12.
- [6] Hitchcock, C.L., *The future of telepathology for the developing world*. Archives of pathology & laboratory medicine, 2011. **135**(2): p. 211-214.
- [7] Black-Schaffer, W.S., et al., *Training pathology residents to practice 21st century medicine: a proposal*. Academic Pathology, 2016. **3**: p. 2374289516665393.
- [8] Murtaza, G., et al., *Deep learning-based breast cancer classification through medical imaging modalities: state of the art and research challenges*. Artificial Intelligence Review, 2020. **53**: p. 1655-1720.
- [9] Esteva, A., et al., *Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks*. nature, 2017. **542**(7639): p. 115-118.
- [10] Mohsen, H., et al., *Classification using deep learning neural networks for brain tumors*. Future Computing and Informatics Journal, 2018. **3**(1): p. 68-71.
- [11] Kuntz, S., et al., *Gastrointestinal cancer classification and prognostication from histology using deep learning: Systematic review*. European Journal of Cancer, 2021. **155**: p. 200-215.
- [12] Chen, X., et al., *Recent advances and clinical applications of deep learning in medical image analysis*. Medical Image Analysis, 2022: p. 102444.
- [13] Litjens, G., et al., *A survey on deep learning in medical image analysis*. Medical image analysis, 2017. **42**: p. 60-88.
- [14] Rajpurkar, P., et al., *Chexnet: Radiologist-level pneumonia detection on chest x-rays with deep learning*. arXiv preprint arXiv:1711.05225, 2017.

- [15] Akbari, M., et al. *Classification of informative frames in colonoscopy videos using convolutional neural networks with binarized weights*. in *2018 40th annual international conference of the IEEE engineering in medicine and biology society (EMBC)*. 2018. IEEE.
- [16] Ponzio, F., et al. *Colorectal cancer classification using deep convolutional networks*. in *Proceedings of the 11th international joint conference on biomedical engineering systems and technologies*. 2018.
- [17] Poudel, S., et al., *Colorectal disease classification using efficiently scaled dilation in convolutional neural network*. *IEEE Access*, 2020. **8**: p. 99227-99238.
- [18] Sarwinda, D., et al., *Deep learning in image classification using residual network (ResNet) variants for detection of colorectal cancer*. *Procedia Computer Science*, 2021. **179**: p. 423-431.
- [19] Su, Y., et al., *Colon cancer diagnosis and staging classification based on machine learning and bioinformatics analysis*. *Computers in Biology and Medicine*, 2022. **145**: p. 105409.
- [20] Naga Raju, M.S. and B. Srinivasa Rao, *Lung and colon cancer classification using hybrid principle component analysis network-extreme learning machine*. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 2023. **35**(1): p. e7361.
- [21] Kumar, A., A. Vishwakarma, and V. Bajaj, *Crccn-net: Automated framework for classification of colorectal tissue using histopathological images*. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2023. **79**: p. 104172.
- [22] Hu, W., et al., *EBHI: A new Enteroscope Biopsy Histopathological H&E Image Dataset for image classification evaluation*. *Physica Medica*, 2023. **107**: p. 102534.
- [23] Yengec-Tasdemir, S.B., et al., *Improved classification of colorectal polyps on histopathological images with ensemble learning and stain normalization*. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2023. **232**: p. 107441.
- [24] Van der Maaten, L. and G. Hinton, *Visualizing data using t-SNE*. *Journal of machine learning research*, 2008. **9**(11).
- [25] Yurdakul, M., İ. Atabaş, and Ş. Taşdemir. *Flower Pollination Algorithm-Optimized Deep CNN Features for Almond (Prunus dulcis) Classification*. in *2024 International Conference on Emerging Systems and Intelligent Computing (ESIC)*. 2024. IEEE.
- [26] Yurdakul, M., İ. Atabaş, and Ş. Taşdemir, *Almond (Prunus dulcis) varieties classification with genetic designed lightweight CNN architecture*. *European Food Research and Technology*, 2024: p. 1-14.
- [27] Uyar, K., M. Yurdakul, and Ş. Taşdemir, *Abc-based weighted voting deep ensemble learning model for multiple eye disease detection*. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2024. **96**: p. 106617.
- [28] Ayhan, B., E. Ayan, and Y. Bayraktar, *A novel deep learning-based perspective for tooth numbering and caries detection*. *Clinical Oral Investigations*, 2024. **28**(3): p. 178.
- [29] Ayan, E., et al., *Dental student application of artificial intelligence technology in detecting proximal caries lesions*. *Journal of Dental Education*, 2024. **88**(4): p. 490-500.
- [30] Ge, S., et al. *Detecting masked faces in the wild with lle-cnns*. in *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2017.
- [31] Akbar, S., et al. *Transitioning between convolutional and fully connected layers in neural networks*. in *Deep Learning in Medical Image Analysis and Multimodal Learning for Clinical Decision Support: Third International Workshop, DLMIA 2017, and 7th International Workshop, ML-CDS 2017, Held in Conjunction with MICCAI 2017, Québec City, QC, Canada, September 14, Proceedings 3*. 2017. Springer.
- [32] Zhang, Q. *Convolutional neural networks*. in *Proceedings of the 3rd International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation*. 2018.

- [33] Albawi, S., T.A. Mohammed, and S. Al-Zawi. *Understanding of a convolutional neural network*. in *2017 international conference on engineering and technology (ICET)*. 2017. Ieee.
- [34] Huang, G., et al. *Densely connected convolutional networks*. in *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2017.
- [35] Szegedy, C., et al. *Rethinking the inception architecture for computer vision*. in *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2016.
- [36] Howard, A.G., et al., *Mobilenets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications*. arXiv preprint arXiv:1704.04861, 2017.
- [37] Simonyan, K. and A. Zisserman, *Very deep convolutional networks for large-scale image recognition*. arXiv preprint arXiv:1409.1556, 2014.
- [38] Chollet, F. *Xception: Deep learning with depthwise separable convolutions*. in *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2017.
- [39] Polikar, R., *Ensemble learning*. Ensemble machine learning: Methods and applications, 2012: p. 1-34.
- [40] Inaba, Y., J.A. Chen, and S.R. Bergmann, *Carotid plaque, compared with carotid intima-media thickness, more accurately predicts coronary artery disease events: a meta-analysis*. *Atherosclerosis*, 2012. **220**(1): p. 128-133.

Türkiye'de Tahıl Üretiminin Tahminlemesi: Karşılaştırmalı Analiz İsmet Soylemez^{*1}, Mehmet Eren Nalici², Ramazan Ünlü³

^{*1,2,3} Abdullah Gül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği, KAYSERİ

(Alınış / Received: 03.07.2024, Kabul / Accepted: 01.08.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.08.2024)

Anahtar Kelimeler

Tahminleme,
Tarımsal Üretim,
ARIMA,
Üstel Düzeltme,
Hareketli Ortalama,
Holt Doğrusal Yöntemi

Öz: Tarım, Türkiye'de hayati bir sektör olmuş ve ülkenin ekonomik ve sosyal yapısına önemli katkılarda bulunmuştur. Bu çalışma, çeşitli tahmin modelleri kullanarak 2023-2030 yılları arasında Türkiye'de dokuz farklı tahıl ürününün üretim miktarlarını tahmin etmeyi amaçlamaktadır. Kullanılan modeller arasında Üstel Düzeltme, Holt Doğrusal Yöntemi, Holt-Winters Sönümlü Trend, Hareketli Ortalama ve ARIMA yer almaktadır. Bu modellerin performansı Ortalama Karesel Hata (MSE) ve Ortalama Mutlak Hata (MAE) değerleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu analiz için kullanılan veriler 1990-2022 yıllarını kapsamaktadır ve Türkiye İstatistik Kurumu'ndan (TÜİK) alınmıştır. Sonuçlar, buğday, arpa, mısır ve yulafın artan bir üretim eğilimi yaşayacağını, çeltik, çavdar, darı ve kaplıca ise azalan bir eğilim göstereceğini göstermektedir. Bu çalışma, iklim değişikliği ve nüfus artışı gibi küresel zorluklar karşısında sürdürülebilir tarımsal üretim ve istikrarı sağlayarak etkili ulusal gıda güvenliği politikaları ve stratejileri geliştirmede doğru tahmin modellerinin önemini vurgulamaktadır.

Forecasting of Agricultural Production in Turkey: Comparative Analysis

Keywords

Forecast,
Agricultural Production,
ARIMA,
Exponential Smoothing,
Moving Average,
Holt Linear Method

Abstract: Agriculture has been a vital sector in Turkey for thousands of years, significantly contributing to the country's economic and social structure. This study aims to forecast the production quantities of nine different grain products in Turkey from 2023 to 2030 using various predictive models. The models employed include Exponential Smoothing, Holt Linear Method, Holt-Winters Damped Trend, Moving Average, and ARIMA. The performance of these models is evaluated using Mean Squared Error (MSE) and Mean Absolute Error (MAE) values. The data used for this analysis spans from 1990 to 2022 and was sourced from the Turkish Statistical Institute (TÜİK). Results indicate that wheat, barley, maize, and oats will experience an increasing production trend, while rice, rye, millet, and spelt show a decreasing trend. This study highlights the importance of accurate forecasting models in developing effective national food security policies and strategies, ensuring sustainable agricultural production and stability in the face of global challenges such as climate change and population growth.

*İlgili Yazar, email: ismet.soylemez@agu.edu.tr

1. Giriş

Tarım binlerce yıldır Türkiye'de önemli bir sektör olmuştur. Anadolu toprakları tarih boyunca çeşitli medeniyetlere ev sahipliği yapmış ve tarımsal faaliyetlerle ayakta tutulmuştur. Topluma gelir kaynağı sağlayarak Türkiye'nin ekonomik ve sosyal yapısında önemli bir rol oynamıştır. Türkiye, elverişli coğrafi konumu, farklı iklimi ve verimli toprakları nedeniyle tarımsal üretim açısından zengindir. Tarımın Türkiye için stratejik önemi, sadece geçmişte değil günümüzde de devam etmektedir. Dünyanın önde gelen ülkeleri, sadece kendi gıda ihtiyaçlarını karşılama konusunda değil, aynı zamanda küresel tarımsal üretimde karar verici konumundadırlar. Gelişmiş

ülkeler, tarımın stratejik önemini kavramış ve sektörü destekleyici politikalar geliştirmiştir. Araştırma, teknoloji ve eğitim gibi alanlara yapılan yatırımlar, tarımsal üretimin verimliliğini artırmış ve sürdürülebilirliğini sağlamıştır. Ayrıca, uluslararası ticaret anlaşmaları ve tarım politikalarındaki uyum, bu ülkelerin küresel tarımsal üretimde etkin rol oynamasını sağlamıştır. Bu çabalar, dünya genelinde gıda güvenliği ve istikrarı için önemli bir katkı sağlamaktadır. Tarım, insanların temel gıda ve giyim ihtiyaçlarının karşılanmasında önemli bir sektördür. Tarih boyunca vazgeçilmez olmuş ve stratejik öneme sahip olmaya devam etmektedir [1]. İklim değişikliği, doğal afetler, kuraklık, kaynak belirsizliği ve nüfus artışı, küresel gıda güvenliğine yönelik giderek artan tehditler oluşturuyor. Dünya nüfusunun 2050 yılında 9,7 milyarı aşacağı, bunun da yaygın açlığa ve gıda güvensizliğine yol açacağı tahmin ediliyor. Gıda tedariki yerli üretim ve ithalat olmak üzere iki ana kaynağa dayanmaktadır. Bir bölgenin gıda üretme kapasitesinin farkındalığı, gıda güvenliği konusunda bilinçli politikaların geliştirilmesi açısından çok önemlidir. Bu nedenle gıda yönetimi ve iş modelleri için doğru tahmin modellerinin geliştirilmesinin gerekli olduğu düşünülmektedir. Ulusal gıda güvenliği politikalarının ve stratejilerinin geliştirilmesi ve uygulanması büyük ölçüde gıda üretimini doğru bir şekilde tahmin etmek için gelişmiş modellerin kullanılmasına bağlıdır. [2,3]

Literatürde gıda ürünlerinin üretim tahminlemesi ile ilgili farklı çalışmalar mevcuttur. Nosratabadi ve arkadaşları [2] tarım ürünlerinin üretim tahminlemesinde uyarlanabilir ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) ve çok katmanlı algılayıcı (MLP) yöntemleri kullanmaktadır. Bunun yanında, Baswaraju ve arkadaşları [3] AROA tabanlı hibrit derin öğrenme modelini tarım ürünlerin üretim miktarının tahminlemesinde, Abraham ve arkadaşları [4] ise yapay sinir ağlarını soya fasulyesi üretimi tahminlemesinde kullanmıştır. Olowa ve Olowa, Wenjun ve arkadaşları [5,6] lineer regresyon yöntemini tarım, balık ve hayvancılık taleplerini tahmin etmek için kullanmıştır. Wang ve arkadaşları [7] yapay sinir ağlarını kullanarak Çin'deki balık ve pirinç üretim miktarlarını, Kharal ve arkadaşları [8] karar destek vektörlerini kullanarak buğdayın verimini tahmin etmeye çalışmıştır. Ayrıca, literatürde tarımsal ürünler ile ilgili farklı tahminleme çalışmaları da bulunmaktadır. Mittal ve Zhang [9] gıdaların donma sürelerinin tahminlenmesi için sinir ağlarını, Lutoslawski ve arkadaşları [10] işlenmiş gıdaların tüketim miktarlarının tahminlemesi için doğrusal olmayan otoregresif eksojen yapay sinir ağını, Mamoudan ve arkadaşları [11] bozulabilir gıdalar için fiyat tahminlemesi için yapay sinir ağlarını, Fahrudin ve arkadaşları [12], Rana ve arkadaşları [13] gıda fiyatlarının tahminlemesi için Uzun kısa süreli bellek (LSTM) yöntemini kullanmıştır. Buna ilaveten, Wu ve Weng [14] gıda güvenliği risk tahmini için toplu öğrenme modellerini kullanmıştır. Diğer yandan, Ye ve arkadaşları [15] çok değişkenli zaman gecikmeli ayrık gri model kullanarak Çin'deki gıda endüstrisinin üretim tahminlemesi; Shi ve arkadaşları [16] lineer regresyon, yapay sinir ağı, karar destek vektörleri ve rassal orman kullanarak Kuzey Kore'deki yer altı verisi seyrek olan bölgelerde pirinç verimliliğinin tahminlemesi; Raihen ve Akter [17] GaussianNB, karar ağacı, K-En yakın komşu algoritması, rassal orman, , karar destek vektörleri XGBoost, LightGBM, AdaBoost, lojistik regresyon, yapay sinir ağı ve derin öğrenme yöntemleri kullanılarak kurutulmuş üzümün sınıflandırılması; Ünlü [18] karar destek vektörleri, ağırlıklandırılmış destek vektörleri kullanılarak şarap kalitesi tahminlemesi üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarda kullanılan metotlar ve çalışmaların amaçları özet şeklinde Tablo 1'de gösterilmiştir.

Türkiye'deki tarımsal üretimin büyük bir bölümünü tahıl ürünleri oluşturmaktadır. Örneğin, buğday ve arpa gibi ürünler hem iç tüketimde hem de ihracatta önemli yer tutmaktadır. Tahıl ürünleri hem Türkiye içinde hem de küresel pazarda yüksek talep gören ürünlerdir. Bu nedenle, bu ürünlerin üretim miktarlarının doğru bir şekilde tahmin edilmesi, ekonomik planlama ve ticaret stratejileri açısından kritiktir. Bu çalışma, Türkiye'de 2023-2030 yılları arasında 9 farklı tahıl ürününün üretim miktarlarını tahmin etmek için çeşitli tahmin modelleri kullanmaktadır. Tarımsal üretim tahminleri, ulusal gıda güvenliği politikalarının ve stratejilerinin geliştirilmesi için hayati öneme sahiptir. Bu çalışma, tarım sektörünün sürdürülebilirliği ve istikrarını sağlamak adına doğru tahmin modellerinin kullanılmasının önemini vurgulamaktadır. Ayrıca, bu çalışmada farklı tahmin modellerinin karşılaştırmalı analizini sunarak, hangi modelin Türkiye'deki tahıl üretimini en doğru şekilde tahmin edebileceğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, tarımsal üretim ve planlama alanında yapılacak sonraki çalışmalar için bir referans kaynağı olma potansiyeline sahiptir.

"Materyal ve Metot" bölümünde, Türkiye'deki tahıl üretim verilerinin nasıl ön işlendiği, ayrıca kullanılan tahmin modelleri ayrıntılı bir şekilde açıklanmaktadır. "Bulgular" başlığı altında, farklı tahmin modellerinin performans karşılaştırmaları ve bu modellerin tahıl üretim tahminleri sunulmaktadır. "Tartışma ve Sonuç" kısmında, elde edilen sonuçlar tartışılmakta ve bu sonuçların Türkiye'nin tarım politikalarına ve gıda güvenliği stratejilerine olan etkileri değerlendirilmektedir. Ek olarak, farklı tahmin modellerinin gelecek çalışmalarda nasıl geliştirilebileceği konusunda önerilerde bulunmaktadır. Ekler kısmında ise, kullanılan veriler ve modellerin geçerlilik testlerine dair detaylar yer almaktadır.

Tablo 1 Çalışmaların Özet Tablosu

Referans No.	Kullanılan Metotlar	Çalışmanın Amacı
[2]	Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) ve Çok Katmanlı algılayıcı (MLP)	Tarım Ürünleri Üretim Miktarı Tahminleme
[3]	AROA Tabanlı Hibrit Derin Öğrenme Modeli	Tarım Ürünleri Üretim Miktarı Tahminleme
[4]	Yapay Sinir Ağları	Soya Fasulyesi Üretim Miktarı Tahminleme
[5]	Lineer Regresyon	Tarım, balık ve hayvancılık Talepleri Tahminleme
[6]	Lineer Regresyon	Tarım, balık ve hayvancılık Talepleri Tahminleme
[7]	Yapay Sinir Ağları	Balık ve Pirinç Üretim Miktarı Tahminleme
[8]	Karar Destek Vektörleri	Buğday Verimi Tahminleme
[9]	Yapay Sinir Ağları	Gıdaların Donma Süresi Tahminleme
[10]	Doğrusal Olmayan Otoregresif Eksojen Yapay Sinir Ağları	İşlenmiş Gıdaların Tüketim Miktarını Tahminleme
[11]	Yapay Sinir Ağları	Bozulabilir Gıdalar için Fiyat Tahminleme
[12]	Uzun kısa süreli bellek (LSTM)	Gıda Fiyatlarını Tahminleme
[13]	Uzun kısa süreli bellek (LSTM)	Gıda Fiyatlarını Tahminleme
[14]	Toplu Öğrenme Modelleri	Gıda Güvenliğinde Risk Tahminleme
[15]	Çok Değişkenli Zaman Gecikmeli Ayrık Gri Model	Gıda Endüstrisi Üretim Miktarı Tahminleme
[16]	Lineer Regresyon, Yapay Sinir Ağları, Karar Destek Vektörleri ve Rassal Orman	Pirinç Verimliliğini Tahminleme
[17]	GaussianNB, Karar Ağacı, K-En Yakın Komşu Algoritması, Rassal Orman, Karar Destek Vektörleri XGBoost, LightGBM, AdaBoost, Lojistik Regresyon, Yapay Sinir Ağları ve Derin Öğrenme Yöntemleri	Kurutulmuş Üzümlerin Sınıflandırılması
[18]	Karar Destek Vektörleri ve Ağırlıklandırılmış Destek Vektörleri	Şarap Kalitesinin Tahminlenmesi

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada Türkiye’de üretilen 9 farklı tahıl ürününün (Buğday, Arpa, Mısır, Çeltik, Çavdar, Yulaf, Kaplıca, Darı, Mahlut) 1990-2022 yılları arasındaki üretim verileri kullanılmıştır. Veri TÜİK sisteminden alınmış olup üretim miktarları ton olarak kullanılmıştır (Ek A.). Verinin ön işleme ve analiz işlemleri Python 3.11.2 sürümü kullanılarak oluşturulmuştur. Veri ön işleme için “Pandas”, “Numpy”, “Sklearn” kütüphaneleri; tahminleme modelleri için Python içerisinde yer alan “Statsmodels” kütüphanesi; modellerin performansının kıyaslanmasında “Sklearn” kütüphanesi; verilerin görselleştirilmesinde “Matplotlib” kütüphanesi kullanılmıştır.

Tahminleme modelleri olarak “Üstel Düzeltme”, “Holt Doğrusal Yöntemi (Holt Linear Trend)”, “Holt Sönme Eğilim (Holt Damped Trend)”, “Hareketli Ortalama” ve “Bütünleşik Otoregresif Hareketli Ortalama (ARIMA)” kullanılmıştır. Üstel düzeltme, zaman serisi verilerindeki kısa vadeli tahminler için yaygın olarak kullanılır ve özellikle mevsimsellik ve trend bileşenlerini yakalamada etkilidir. Holt doğrusal yöntemi, trend içeren veriler için uygundur ve zaman serisi verilerinde belirgin trendlerin olduğu durumlarda iyi sonuç verir. Holt sönme eğilim yöntemi, uzun vadeli tahminlerde trendin sönümlenmesini sağlar, bu da aşırı tahmin riskini azaltır. Hareketli ortalama basit ve anlaşılır bir yöntemdir, verideki gürültüyü azaltmak ve genel eğilimi görmek için kullanılır. ARIMA, zaman serisi verilerinde yaygın olarak kullanılan, geçmiş verilerden gelecekteki değerleri tahmin eden güçlü bir modeldir. Ayrıca, seçilen modellerin uygulanabilirliği, anlaşılabilirliği ve sonuçların tarımsal üretimle ilgilenen paydaşlar tarafından kolayca yorumlanabilmesi açısından önemlidir. Buna ilaveten, modellerin performans kıyaslaması için veri seti eğitim ve test olarak ikiye bölünmüştür ve test değerleri için ortalama hata karesi (MSE) ve ortalama mutlak hata (MAE) değerleri kıyaslanmıştır. Ayrıca, eğitim veri seti verinin ilk 0,8 verisinden, test veri seti verinin son 0,2 verisinden oluşmaktadır.

2.1. Veri ön işleme

Veri setlerinde analize başlamadan önce verinin durağan (stationary) olup olmaması analiz edilmiştir. Serinin deterministik özellikleri sabit, trend ve mevsimsellik bileşenlerinin varlığı veya yokluğu ile belirlenir. Bir serinin

stokastik özellikleri öncelikle değişkenlerin durağan olup olmadığıyla ilgilidir. Ancak zaman serisi analizi yapılırken analiz edilen serilerin durağan olduğunun belirlenmesi büyük önem taşımaktadır [19]. 9 tahıl ürünü için durağanlık analizi yapılmıştır. Bu analiz için Dickey-Fuller testi kullanılmıştır. Dickey-Fuller testi, otoregresif (AR) bir zaman serisi modelinin birim kök içerip içermediğini belirlemek için kullanılan istatistiksel bir testtir. Alternatif hipotez, kullanılan testin versiyonuna bağlı olarak değişir, ancak genellikle ya durağanlığı ya da trend-durağanlığı içerir [20]. Her bir tahıl ürünü için 0,95 güven aralığı için Dickey-Fuller testi uygulanmıştır ve p değerlerine göre durağan olup olmadığı Tablo 2.'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Tahıl ürünleri durağanlık tablosu

Tahıl Ürünü	Durağan / Durağan değil
Buğday	Durağan
Arpa	Durağan
Mısır	Durağan değil
Çeltik	Durağan değil
Çavdar	Durağan değil
Yulaf	Durağan değil
Kaplıca	Durağan değil
Darı	Durağan
Mahlut	Durağan

Durağan olmayan verileri durağanlaştırmak için Farklılaştırma (Differencing) ve Dönüşüm (Transformation) yöntemleri kullanılmıştır. Farklılaştırma, değişimi ortadan kaldırmak ve durağanlığı sağlamak için durağan olmayan serilerin bir, iki, hatta üç kez farkının alınması yöntemidir. Fark alma, durağan olmayan bütünleşmiş seriler için uzun hafızalı zaman serisi analizinin hafıza parametresini tahmin etmek için kullanılır [21]. Çeltik Çavdar ve Yulaf için mevcut bir kez farkı alınarak mevcut veriden çıkartılarak yeni veri elde edilmiştir. Dahası, Mısır verisi için üç farkı alınarak mevcut veriden çıkartılarak yeni veri elde edilmiştir. Kaplıca verisinin durağanlaştırılması içinse Dönüşüm yöntemi kullanılmıştır. Literatürde zaman serilerindeki durağanlık sorununun üstesinden gelmek için çeşitli dönüşüm yöntemleri önerilmiştir. Ancak belirli bir zaman serisi uygulaması için uygun yöntemin seçilmesi basit bir iş değildir. Her yöntemin özelliklerini ve beklenen faydalarını analiz etmek çok önemlidir. Önemli hususlar, başlangıçtaki veri varsayımlarını ve yöntemin kendine özgü özelliklerini içerir [22]. Veriyi durağanlaştırmak için Kaplıca verisinin logaritma 10 tabanında değerleri oluşturulmuştur. Daha sonra, oluşturulan bu verinin 3 farkı alınarak ilk veriden çıkarılmıştır. En son oluşturulan tüm veriler için Dickey-Fuller testi ile tekrar test edilmiş 0,95 güven aralığında tüm veriler durağan olduğu tespit edilmiştir.

Analize başlamadan önce veri seti normalize edilmiştir. Veri normalleştirme yönteminin temel amacı, herhangi bir öğrenme algoritmasına beslenebilecek yüksek kaliteli veriler üretmektir. Zaman serisi verileri geniş bir değer aralığına sahip olabilir, dolayısıyla öğrenme sürecini hızlandırmak için aynı değer aralığına ölçeklendirilmesi gerekir [23].

2.2. Üstel düzeltme

Üstel düzeltme, açıklığı, uyarlanabilirliği ve şeffaflığı nedeniyle yaygın olarak kullanılan bir tahmin yöntemidir [24]. Üstel düzeltme, hata, eğilim ve mevsimsellik değişkenleri olmak üzere 3 temel bileşeni içerir. Yöntemin çalışma prensibi güncel veri ve gözlemlerin eskilere göre daha fazla önem taşımasıdır [25]. Üstel düzeltme, özyinelemeli bir formül kullanarak tüm gözlemlerin ağırlıklarını hesaplar ve bu bilgiyi geleceğe ilişkin tahminlerde bulunmak için kullanılır. [26].

$$X_t = \alpha x Y_{t-1} + (1-\alpha) x X_{t-1} \quad (1)$$

Denklem 1'de üstel düzeltme denklemi gösterilmiştir. X_t , t zamanında tahmin edilen değeri, X_{t-1} , t - 1 zamanında tahmin edilen değeri, Y_{t-1} , t - 1 zamanındaki gerçek değeri ifade etmektedir. Ayrıca α değeri 0 ile 1 arasında belirlenen verinin yumuşatma faktörünü belirtmektedir. Bu çalışmada, α değeri 0,01 ile 1 arasındaki 0,01 arttırarak her bir tahıl ürünü için tahminlemesi yapılmış ve ortalama hata karesi değerleri hesaplanmıştır.

2.3. Holt doğrusal yöntemi

Üstel ağırlıklı hareketli ortalama, rastgele değişkenliği yumuşatmaya yönelik bir yöntemdir. Eski verilere daha az ağırlık vermesi, hesaplamının basit olması ve veri kümesi için minimum düzeyde veri gerektirmesi bu metodun

avantajlarından [27]. Holt üstel düzeltme, trend verilerini doğrudan düzelteren ve ikincil üstel düzeltmeyi kullanmadan orijinal zaman serisini tahmin eden doğrusal bir üstel düzeltme yöntemidir. Bu yöntemin en belirgin avantajı, zaman serilerindeki trendin değişmesi, trend verilerini doğrudan yumuşatması ve ikincil üstel düzeltme kullanmadan orijinal zaman serisini tahmin etmesidir. Esnekliği nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır [28]. Holt üstel düzgünleştirme iki temel yumuşatma formülü ve bir tahmin formülü vardır (Denklem 2).

$$\begin{aligned} X_{t+T} &= L_{t-1} + k_{t-1} \times T \\ L_t &= \alpha \times Y_t + (1-\alpha) \times (L_{t-1} + k_{t-1}) \\ k_t &= \beta \times (L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta) \times k_{t-1} \end{aligned} \quad (2)$$

Denklem 2'de Holt Doğrusal Yönteminin denklem hesapları gösterilmiştir. X_t , t zamanında tahmin edilen değerini; L_t , t zamanındaki seviye değerini; k_t , t zamanındaki trend değerini ve T ise tahmin dönemi periyodunu ifade etmektedir. Buna ilaveten, α ve β değerleri 0 ile 1 arasında sırasıyla seviye yumuşatma faktörü ve trend yumuşatma faktörüdür. Bu çalışmada, her bir tahıl ürünü için α ve β değerleri, 0,01'den 1'e 0,01 artırılarak tahminleme çalışması yapılmıştır. Daha sonra ortalama hata karesi değerleri hesaplanmıştır.

2.4. Holt sönme eğilim yöntemi

Holt'un doğrusal yöntemi, gelecekte süresiz olarak artan veya azalan sabit bir eğilim sergileyen tahminler üretir. Ancak ampirik kanıtlar, bu yöntemlerin özellikle daha uzun tahmin ufukları için aşırı tahmin yapma eğiliminde olduğunu göstermektedir [29]. Gelecekte bir noktada trendi düz bir çizgiye 'sönümleyen' bir parametre tanıttı. Sönümlü trend içeren yöntemler birçok serinin otomatik tahmininde başarılı ve popülerdir [30].

$$\begin{aligned} X_{t+h} &= L_t + (j + j^2 + j^3 + \dots + j^h) \times k_{t-1} \\ L_t &= \alpha \times Y_t + (1-\alpha) \times (L_{t-1} + (j \times k_{t-1})) \\ k_t &= \beta \times (L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta) \times j \times k_{t-1} \end{aligned} \quad (3)$$

Holt Sönme Eğilim yönteminde kullanılan denklemler Denklem 3'te gösterilmiştir. X_{t+h} , t zamanından h zaman sonrasının tahmin edilen değerini; L_t , t zamanındaki seviye değerini ve k_t , t zamanındaki trend değerini ifade etmektedir. Holt Doğrusal Yönteminden farklı olarak trend değeri bir sönümleme değeri (j) ile çarpılmaktadır. Bu değer 0 ile 1 arasında değer almaktadır. Bu çalışmada, her bir tahıl ürünü için α , β değerleri, 0,01'den 1'e 0,01 artırılarak farklı parametreler için ortalama hata karesi değerleri hesaplanmıştır. Buna ilaveten Sönümleme katsayısı her α ve β kombinasyonu için optimize edilerek hesaplanmıştır.

3.5. Hareketli ortalama

Basit Hareketli Ortalama, zaman serisi verilerinde önceki n veri noktasının ortalamasını hesaplamak için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Zaman serisindeki her veri noktasına herhangi bir ek ağırlıklandırma faktörü uygulanmadan eşit ağırlık verilir [31]. Veriler ortalamasının etrafında merkezlenmemişse, basit bir hareketli ortalama, en son verinin örnek genişliğinin yarısı kadar gerisinde kalacaktır. Ek olarak, bir Basit Hareketli Ortalama, eski verilerin azalmasından veya yeni verilerin gelmesinden orantısız bir şekilde etkilenebilir. Basit Hareketli Ortalamasının bir özelliği, eğer veriler periyodik dalgalanmalar gösteriyorsa, o döneme ait bir Basit Hareketli Ortalama uygulanmasının bu varyasyonu ortadan kaldırmasıdır. Ancak mükemmel derecede düzenli döngülere nadiren rastlanır [32].

$$X = \frac{Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n}{n} \quad (4)$$

Denklem 4'te X, tahmin edilen değeri ifade etmektedir. Buna ilaveten, Y değerleri X'den n periyot öncesine kadar olan değerleri ifade etmektedir. Bu çalışmada ise n değeri 2,3 ve 4 olarak alınmış ve her bir tahıl ürünü ve her bir n değeri için ortalama hata karesi değeri hesaplanmıştır.

3.6. Bütünleşik otoregresif hareketli ortalama (ARIMA)

Otomatik Regresif Entegre Hareketli Ortalama (ARIMA), zaman serisi verilerini tahmin etmek için yaygın olarak kullanılan olasılıksal bir yöntemdir. Finans sektöründe hisse senedi ve hava durumu tahminlerinin yanı sıra sinyaller

işlemede de yaygın olarak kullanılır [33]. ARIMA yöntemi zaman serisi analizinde en çok bilinen yaklaşımdır. Bu yöntem, bazen Box-Jenkins modelleri olarak da adlandırılan ARMA modellerinin analizini büyük ölçüde kolaylaştırır [34]. Yapı, otoregresif AR(p), hareketli ortalama MA(q), otoregresif hareketli ortalama ARMA(p,q) ve otoregresif entegre hareketli ortalama ARIMA(p,d,q) modellerini içerir [35]. Orijinal veriler iteratif olarak dönüştürüldükten sonra istatistiksel olarak durağan zaman serisi verileri elde edilebilir. Çoğu durumda, geçmiş tahmin hataları da dahil olmak üzere mevcut ve geçmiş durumlar içindeki doğrusal veya doğrusal olmayan ilişkiyi temsil edecek uygun bir ARIMA modelinin tanımlanması gerekir [36].

$$Y_t = c + \beta_1 x Y_{t-1} + \beta_2 x Y_{t-2} + \dots + \alpha_t - \gamma_1 x \alpha_{t-1} - \gamma_2 x \alpha_{t-2} - \dots \quad (5)$$

Denklem 5'te belirtilen modelde Y_t , t zamanındaki değeri; c sabit bir değeri, β otoregresif sabitini (p); α_t , t zamanındaki tahmin hatası; γ , hareketli ortalama katsayısını ifade etmektedir. Bu çalışmada her bir tahıl ürünü için 0 ile 8 arasındaki p, d ve q değerleri için kombinasyonları oluşturulmuştur ve bu kombinasyonlar ARIMA modeli için parametre değeri olarak kullanılmıştır. Her bir model için ortalama hata karesi değeri hesaplanmıştır.

3. Bulgular

2. bölümde belirtilen modellerin geçerlemesi (validation) için veri seti eğitim ve test olmak üzere ikiye bölünmüş ve her model için ortalama kare hata değeri hesaplanmıştır. Her bir model için en düşük ortalama hata kare değerini veren parametrelerin birbirleri ile kıyaslaması Tablo 3'te gösterilmiştir. Buna ilaveten, parantez içinde kullanılan parametrelerin değerleri belirtilmiştir. Ayrıca, her bir tahıl ürünü için her modelin en küçük ortalama kare hatası değeri veren parametresine göre karşılaştırmalı değerleri gösterilmiştir (Ek B.). Grafiklerdeki verilerde normalize edilmiş değerler kullanılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde Mahlut ürününde Holt Doğrusal yöntemi Holt Sönme Eğilim Yöntemi ve ARIMA modellerinin negatif değer tahminlemesi yaptığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi olarak Mahlut ürününün üretiminde düşüş trendinde olması ve son yıllarda üretim yapılmaması olduğu düşünülmektedir. ARIMA ve Hareketli Ortalama modellerinin tahmin doğruluğu açısından öne çıktığını göstermektedir. Buğday üretimi tahminlerinde, ARIMA modeli ve Hareketli Ortalama modeli en düşük MSE değerlerini vermiştir. Arpa üretimi tahminlerinde de Hareketli Ortalama ve ARIMA modelleri en düşük MSE değerlerini sağlamıştır. Darı üretimi tahminlerinde en düşük MSE değeri ARIMA modelinden elde edilmiştir. Çeltik üretimi tahminlerinde ise Hareketli Ortalama modeli en düşük MSE değerini vermiştir. Çavdar üretimi için ARIMA modeli en düşük MSE değerini vermiş ve bu ürün için en uygun model olarak belirlenmiştir. Yulaf ve Mısır üretim tahminlerinde de Hareketli Ortalama modeli en düşük MSE değerlerine ulaşmış, bu da bu ürünlerin üretiminde en doğru tahminleri sağladığını ortaya koymaktadır. Son olarak, Kaplıca üretimi tahminlerinde de en düşük MSE değeri Hareketli Ortalama modelinden elde edilmiştir.

Tablo 3 Ortalama hata karesi değerleri özet tablo

Ürün Adı	Üstel Düzeltme (α)	Holt Doğrusal Yöntemi ($\alpha; \beta$)	Holt Sönme Eğilim Yöntemi ($\alpha; \beta; j$)	ARIMA (p,d,q)	Hareketli Ortalama (n)
Buğday	(0,03) 0.0462	(0,22; 0,01) 0.0374	(0,08; 0,45; 0,8) 0.0735	(5,0,6) 0.024	(3) 0.0222
Arpa	(0,36) 0.0549	(0,2; 0,77) 0.0479	(0,17; 0,99; 0,8) 0.0504	(2,2,5) 0.0412	(3) 0.0378
Darı	(0,01) 0.1268	(0,19; 0,86) 0.0174	(0,99; 0,99; 0,8) 0.0305	(5,3,4) 0.0084	(2) 0.0117
Mahlut	(0,99) 0.0005	(0,68; 0,37) 0	(0,77; 0,17; 0,91) 0	(5,2,0) 0.00004	(2) 0
Çeltik	(0,96) 0.0413	(0,07; 0,62) 0.0356	(0,75; 0,98; 0,8) 0.0386	(0,2,3) 0.038	(2) 0.0204
Çavdar	(0,23) 0.0678	(0,18; 0,11) 0.0677	(0,06; 0,99; 0,8) 0.0671	(7,1,4) 0.039	(2) 0.0428
Yulaf	(0,25) 0.0941	(0,08; 0,9) 0.0639	(0,11; 0,98; 0,8) 0.0795	(4,2,2) 0.0546	(3) 0.0447
Mısır	(0,01) 0.1118	(0,01; 0,38) 0.101	(0,98; 0,01; 0,8) 0.1125	(2,1,2) 0.0609	(2) 0.0168
Kaplıca	(0,5) 0.0751	(0,14; 0,98) 0.0524	(0,18; 0,99; 0,8) 0.0609	(0,1,5) 0.0379	(2) 0.0358

Diğer yandan, Tablo 4'de tüm ürün tipleri için tahminler gerçekleştirilmiş olup, en küçük MAE değerini veren tahmin değerleri hesaplanmıştır. MAE değerleri analiz edildiğinde en küçük olan parametrelerin hareketli ortalama, üstel düzeltme ve Holt sönme eğilim yöntemi için de MSE sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Geçerlemede kullanılan modeller ile 2023-2030 yılları arasındaki üretim miktarlarının tahmin edilmesi yapılmıştır (Ek C.). Daha iyi ve güvenilir tahminleme sonuçları elde edebilmek için sonuçların bir araya getirilmesi

amaçlanmıştır. Bu yüzden, Tablo A2’de belirtilen modellerin tahmin sonuçlarının aritmetik ortalaması alınarak her bir tarım ürünü için 2023-2030 yılları arasındaki üretim tahminleri Tablo 5’te belirtilmiştir. Ancak, Mahlut ürününde Holt Doğrusal yöntemi Holt Sönme Eğilim Yöntemi ve ARIMA modellerinin negatif değer tahminlemesi yapıldığı için Mahlut ürününün tahminlemesinde bu modellerin sonuçları ortalamaya dahil edilmemiş ve sıfır kabul edilmiştir. Buna ilaveten Kaplıca ürününde Holt Doğrusal yöntemi Holt Sönme Eğilim Yöntemi modellerinin negatif değer tahminlemesi yapıldığı için Kaplıca ürününün tahminlemesinde bu modellerin sonuçları ortalamaya dahil edilmemiş ve sıfır kabul edilmiştir. Ortalama sonuçları yukarı yuvarlanmıştır.

Tablo 4 Ortalama Mutlak Hata değerleri özet tablo

Ürün Adı	Üstel Düzeltme (α)	Holt Doğrusal Yöntemi ($\alpha; \beta$)	Holt Sönme Eğilim Yöntemi ($\alpha; \beta; j$)	ARIMA (p,d,q)	Hareketli Ortalama (n)
Buğday	(0,07) 0,165	(0,26; 0,01) 0,145	(0,08; 0,45; 0,8) 0,206	(5,0,2) 0,131	(3) 0,122
Arpa	(0,36) 0,198	(0,2; 0,77) 0,158	(0,17; 0,99; 0,8) 0,178	(2,2,5) 0,176	(3) 0,151
Darı	(0,01) 0,325	(0,24; 0,55) 0,086	(0,99; 0,99; 0,8) 0,165	(5,3,0) 0,082	(2) 0,093
Mahlut	(0,99) 0,020	(0,69; 0,36) 0,004	(0,77; 0,17; 0,9) 0,003	(5,2,0) 0,006	(2) 0,002
Çeltik	(0,96) 0,186	(0,78; 0,98) 0,175	(0,75; 0,98; 0,8) 0,186	(0,2,2) 0,180	(2) 0,129
Çavdar	(0,23) 0,184	(0,06; 0,99) 0,172	(0,08; 0,98; 0,8) 0,176	(4,1,2) 0,153	(2) 0,149
Yulaf	(0,25) 0,243	(0,08; 0,99) 0,200	(0,11; 0,98; 0,8) 0,212	(6,2,2) 0,179	(3) 0,171
Mısır	(0,01) 0,276	(0,01; 0,31) 0,259	(0,98; 0,01; 0,8) 0,277	(3,0,0) 0,174	(2) 0,115
Kaplıca	(0,99) 0,195	(0,24; 0,53) 0,144	(0,21; 0,99; 0,8) 0,149	(4,3,2) 0,139	(2) 0,131

Tablo 5 2023-2030 yılları arası Tahıl Ürünleri Üretim Tahminleri (Milyon Ton)

Yıl	ARPA	MISIR	DARI	YULAF	ÇELTİK	ÇAVDAR	KAPLİCA	BUĞDAY
2023	7,906	7,171	0,0044	0,338	0,989	0,282	0,0042	19,557
2024	7,907	7,327	0,0043	0,352	0,982	0,282	0,0037	19,645
2025	7,971	7,379	0,0042	0,367	0,981	0,275	0,0036	19,719
2026	7,968	7,473	0,0041	0,377	0,978	0,267	0,0037	19,754
2027	8,135	7,553	0,0039	0,392	0,975	0,266	0,0036	19,724
2028	8,210	7,634	0,0038	0,409	0,973	0,261	0,0036	19,774
2029	8,347	7,720	0,0037	0,425	0,970	0,258	0,0036	19,738
2030	8,422	7,797	0,0035	0,442	0,968	0,250	0,0036	19,735

4. Tartışma ve Sonuç

Birleştirilmiş tahmin değerleri incelendiğinde, Arpa, Mısır, Buğday ve Yulaf üretimden artış trendi gözlenmiştir. Diğer yandan, Çeltik, Çavdar, Darı ve Kaplıca ürünlerinde azalış trendi gözlemlenmiştir. Mahlut ürününde ise son 5 senedeki gibi üretim olmayacağı tahmin edilmektedir. Arpa, Mısır ve Yulaf ürünlerinde Türkiye’nin 32 yıllık ortalama üretim miktarının üzerinde üretim yapacağı tahmin edilmiştir. Ancak, Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü’nün [37] verilerine göre 2022 yılında Türkiye’nin Arpa, Mısır ithalatı sırasıyla 1,6 milyon ton ve 3,4 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Tüketim miktarının aynı kaldığı var sayılırsa Arpa ve Mısır üretimindeki artış ile ithalat miktarının azalacağı öngörülmektedir. Diğer yandan, Buğday üretiminin Türkiye’nin 32 yıllık ortalama üretim miktarı ile yaklaşık olarak aynı kalacağı öngörülmektedir.

Son dönemde Arpa, Mısır, Buğday ve Yulaf gibi stratejik ürünlerdeki artış trendi, tarımsal üretimin potansiyelini ve çeşitliliğini ortaya koymaktadır. Bu artış eğilimi, tarım politikalarının ve çiftçilere sağlanan desteklerin etkili bir şekilde uygulanmasıyla elde edilmiştir. Üretimdeki artış trendi, tarımsal üretimin sürdürülebilirliğini ve ulusal gıda güvenliğini güçlendirmektedir. Arpa, Mısır ve Yulaf gibi ürünlerdeki artış, Türkiye’nin dışa bağımlılığını azaltarak ekonomik bağımsızlığını güçlendirecektir. Aynı zamanda, bu ürünlerin iç piyasada bol miktarda bulunması, tüketicilere daha sağlıklı ve uygun fiyatlı gıda erişimi sağlayacaktır. Ancak, azalış trendi gösteren Çeltik, Çavdar, Darı ve Kaplıca gibi ürünlerde çiftçilere yönelik desteklerin artırılması ve verimliliği artıracak tedbirlerin alınması önemlidir. Bu ürünlerdeki azalışın tersine dönmesi, tarımsal çeşitliliği artırarak ekonomik kalkınmaya katkı sağlayacaktır. Tarım sektörünün desteklenmesi, sadece çiftçilerin refahını artırmakla kalmayacak, aynı

zamanda kırsal kalkınmayı teşvik ederek iş imkanları yaratacaktır. Bu nedenle, tarım politikalarının ve uygulamalarının çiftçilerin ihtiyaçlarına ve sektörün gereksinimlerine göre şekillendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Türkiye’nin tarımsal potansiyelini tam anlamıyla değerlendirebilmesi için sürdürülebilir ve kapsayıcı bir tarım politikasının benimsenmesi elzemdir. Bu politikaların çiftçilerin yanı sıra çevreyi de koruyacak şekilde tasarlanması, gelecek nesillere daha yaşanabilir bir dünya bırakılmasına katkı sağlayacaktır.

Tahıl ürünleri Türkiye’nin her döneminde önemli bir tüketim ve ihracat ürünü olmuştur. Tahıl üretimi stratejik açıdan bakıldığında sadece Türkiye’nin kendi gıda ihtiyacını karşılamayı değil, aynı zamanda küresel tarımsal üretimde kilit karar vericilerden biri olmak için de önemlidir. Bu çalışmada, 9 farklı tahıl ürününün 2023-2030 yılları arasındaki üretim miktarının tahminlenmesi amaçlanmıştır. Tahminleme modelleri olarak “Üstel Düzeltme”, “Holt Doğrusal Yöntemi”, “Holt Sönme Eğilim”, “Hareketli Ortalama” ve “Bütünleşik Otoregresif Hareketli Ortalama (ARIMA)” kullanılmıştır. Modellerin farklı parametrelerdeki performansları ortalama hata karesi değerlerine göre kıyaslanmıştır. Her bir modelin en düşük ortalama hata karesi değerini veren parametreleri ile diğer modellerin kıyaslaması yapılmış ve 2023-2030 yılları arasında tahminlemesi yapılmıştır. Buna ilaveten, daha tutarlı sonuç alınabilmesi için her bir modelin tahmin değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak tahminler oluşturulmuştur.

İlerleyen çalışmalarda, yapay sinir ağları, derin öğrenme gibi farklı makine öğrenmesi teknikleri ile tahminleme çalışmaları yapılabilir. Modellerin performanslarının kıyaslamak için farklı anahtar performans göstergeleri kullanılabilir. Ayrıca, modellerin sonuçları birleştirilirken her modelin tahminlerine bir ağırlık atayarak ve bu ağırlıklı tahminlerin ortalamasını alarak birleştirilebilir. Ağırlıklar, modellerin geçmiş performansına veya güvenilirliğine göre belirlenebilir veya birçok farklı modeli birleştirmek için daha karmaşık teknikler (istifleme veya artırma) (Stacking ve Bagging) yöntemleri kullanılabilir.

Kaynakça

- [1] E. Ergüneş Berkin, “Türkiye’de Tarımsal Eğitimin Tarihi”, Black Sea Journal of Public and Social Science, Şub. 2024.
- [2] S. Nosratabadi, S. Ardabili, Z. Lakner, C. Mako, ve A. Mosavi, “Prediction of Food Production Using Machine Learning Algorithms of Multilayer Perceptron and ANFIS”, Agriculture, c. 11, sy 5, s. 408, May. 2021.
- [3] S. Baswaraju, V. U. Maheswari, krishna K. Chennam, A. Thirumalraj, M. V. V. P. Kantipudi, ve R. Aluvalu, “Future Food Production Prediction Using AROA Based Hybrid Deep Learning Model in Agri-Sector”, Human-Centric Intelligent Systems, c. 3, sy 4, ss. 521-536, Eki. 2023.
- [4] E. R. Abraham vd., “Time Series Prediction with Artificial Neural Networks: An Analysis Using Brazilian Soybean Production”, Agriculture, c. 10, sy 10, s. 475, Eki. 2020.
- [5] Olowa O.W. ve Olowa O.A., “Food demand forecast for Nigeria (2016-2028)”, Scientia Agriculturae, c. 15, sy 1, May. 2016.
- [6] Z. Wenjun, B. Changjun, ve L. Guodao, “A longer-term forecast on global supply and demand of food products”, J Food Agric Environ, c. 5, sy 1, ss. 105-110, 2007.
- [7] Wang, J., Zeng, G., Xu, M., Wan, X., Wang, K., Mou, J., Hua, C., Fan, C., & Han, P. (2024). SSA-BP Neural Network Model for Predicting Rice-Fish Production in China. Journal of Applied Ichthyology, 2024(1).
- [8] Kharal, A. S., Mahar, S. A., Mushtaque, M. I., Magsi, A., & Mahar, J. A. (2024). A Model for Wheat Yield Prediction to Reduce the Effect of Climate Change Using Support Vector Regression. VFAST Transactions on Software Engineering, 12(2), 192-212.
- [9] G. S. Mittal ve J. Zhang, “Prediction of freezing time for food products using a neural network”, Food Research International, c. 33, sy 7, ss. 557-562, Ağu. 2000.
- [10] K. Lutoslawski, M. Hernes, J. Radomska, M. Hajdas, E. Walaszczyk, ve A. Kozina, “Food Demand Prediction Using the Nonlinear Autoregressive Exogenous Neural Network”, IEEE Access, c. 9, ss. 146123-146136, 2021.
- [11] Mamoudan, M. M., Mohammadnazari, Z., Ostadi, A., & Esfahbodi, A. (2022). Food products pricing theory with application of machine learning and game theory approach. International Journal of Production Research, 1-21.
- [12] Rifqi Fahrudin, Kusnadi Kusnadi, & Lukita, C. (2024). Price Prediction System of Basic Commodities Using Long Short-Term Memory Method: Analysis and Implementation for Future Projections. Journal Research of

Social Science, Economics, and Management/Journal Research of Social Science, Economics and Management, 3(7).

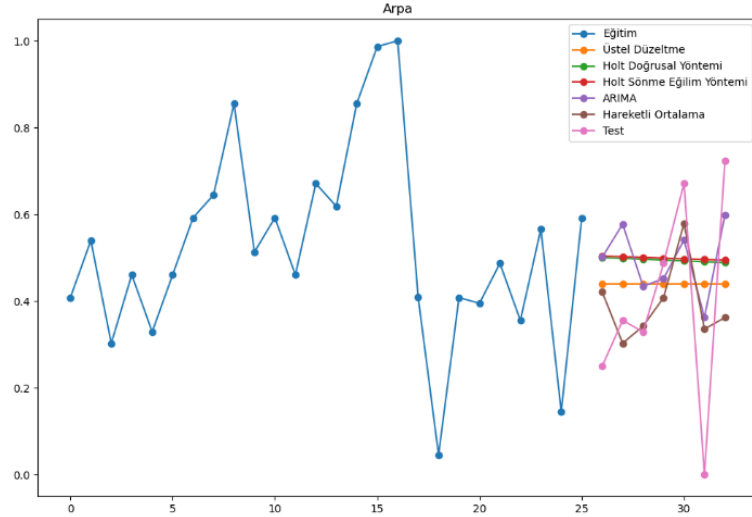
- [13] Rana, H., Farooq, M. U., Kazi, A. K., Baig, M. A., & Akhtar, M. A. (2024). Prediction of Agricultural Commodity Prices using Big Data Framework. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 14(1), 12652–12658.
- [14] L.-Y. Wu ve S.-S. Weng, “Ensemble Learning Models for Food Safety Risk Prediction”, *Sustainability*, c. 13, sy 21, s. 12291, Kas. 2021.
- [15] Ye, J., Li, Y., Meng, F., & Geng, S. (2024). A novel multivariate time-lag discrete grey model based on action time and intensities for predicting the productions in food industry. *Expert Systems with Applications*, 238, 121627–121627.
- [16] Shi, Y., Li, L., Wu, B., Zhang, Y., Wang, B., Niu, W., He, L., Jin, N., Pan, S., Tian, H., & Yu, Q. (2024). Predicting rice productivity for ground data-sparse regions: A transferable framework and its application to North Korea. *Science of the Total Environment*, 946, 174227–174227.
- [17] Md Nurul Raihen, & Akter, S. (2023). Prediction modeling using deep learning for the classification of grape-type dried fruits. *International Journal of Mathematics and Computer in Engineering*, 0(0).
- [18] Ünlü, R. (2020). The Role of Machine Learning in Productivity: A Case Study of Wine Quality Prediction. *European Journal of Science and Technology*, (20), 280-286.
- [19] M. Yavuz, “Türkiye’de İhracatın Ekonomik Büyüme Üzerine Etkisi: Bir Zaman Serisi Analizi”, e Ege Üniversitesi, 15. İktisat Öğrencileri Kongresi, 2012.
- [20] D. A. Dickey ve W. A. Fuller, “Distribution of the Estimators for Autoregressive Time Series with a Unit Root”, *J Am Stat Assoc*, c. 74, sy 366a, ss. 427-431, Haz. 1979.
- [21] Z. Hossain, A. Rahman, M. Hossain, ve J. H. Karami, “Over-Differencing and Forecasting with Non-Stationary Time Series Data”, *Dhaka University Journal of Science*, c. 67, sy 1, ss. 21-26, 2019.
- [22] R. Salles, K. Belloze, F. Porto, P. H. Gonzalez ve E. Ogasawara, “Nonstationary time series transformation methods: An experimental review”, *Knowl Based Syst*, c. 164, ss. 274-291, Oca. 2019.
- [23] D. A. Bhanja Samit, “Impact of Data Normalization on Deep Neural Network for Time Series Forecasting”, *ArXiv*, Ara. 2018.
- [24] M. Yagimli ve H. Ergin, “Türkiye’de İş Kazalarının Üssel Düzeltme Metodu ile Tahmin Edilmesi”, *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, Oca. 2018.
- [25] C. Bergmeir, R. J. Hyndman, ve J. M. Benítez, “Bagging exponential smoothing methods using STL decomposition and Box-Cox transformation”, *Int J Forecast*, c. 32, sy 2, ss. 303-312, Nis. 2016.
- [26] X. Hu, J. Li, ve M. Huang, “Research On Replenishment Decision of Vegetable Commodities Based on Seasonal Decomposition Exponential Smoothing Method and Objective Programming Model”, *Highlights in Business, Economics and Management*, c. 25, ss. 151-159, Oca. 2024.
- [27] M. Abotaleb vd., “State of the art in wind speed in England using BATS, TBATS, Holt’s Linear and ARIMA model”, *MAUSAM*, c. 73, sy 1, ss. 129-138, Oca. 2022.
- [28] X. Li, “Comparison and Analysis Between Holt Exponential Smoothing and Brown Exponential Smoothing Used for Freight Turnover Forecasts”, içinde 2013 Third International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications, *IEEE*, Oca. 2013, ss. 453-456.
- [29] E. S. Gardner ve Ed. Mckenzie, “Forecasting Trends in Time Series”, *Manage Sci*, c. 31, sy 10, ss. 1237-1246, Eki. 1985.
- [30] R. J. Hyndman ve G. Athanasopoulos, *Forecasting: principles and practice*, 3rd Edition. Melbourne: OTexts, 2021.
- [31] S. Hansun, “A new approach of moving average method in time series analysis”, içinde 2013 Conference on New Media Studies (CoNMedia), *IEEE*, Kas. 2013, ss. 1-4.
- [32] Y.-L. Chou, *Statistical Analysis*, First Edition. Holt Rinehart Winston, 1975.
- [33] A. K. Sharma, P. Punj, N. Kumar, A. K. Das, ve A. Kumar, “Lifetime Prediction of a Hydraulic Pump Using ARIMA Model”, *Arab J Sci Eng*, c. 49, sy 2, ss. 1713-1725, Şub. 2024.

- [34] G. Box ve G. Jenkins, Time series analysis; forecasting and control. San Francisco: Holden-Day, 1970.
- [35] V. Önen, "Arıma Yöntemiyle Türkiye 'nin Hava Yolu Kargo Talep Tahmin Modellemesi ve Öngörüsü", Yönetim ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi, c. 18, sy 4, ss. 29-53, Ara. 2020.
- [36] Y. Lu ve S. M. AbouRizk, "Automated Box-Jenkins forecasting modelling", Autom Constr, c. 18, sy 5, ss. 547-558, Ağu. 2009.
- [37] United Nations 2024, "Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü". <https://www.fao.org/turkiye/tr/> (Erişim Tarihi: 03.07.2024)

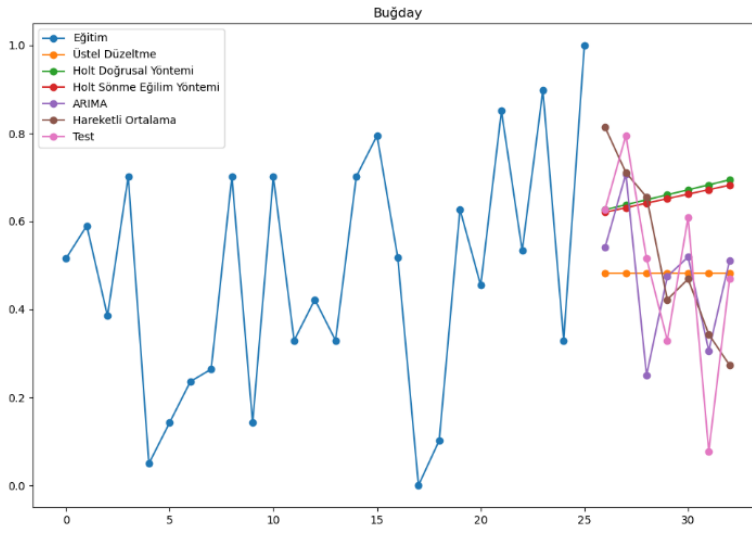
Ekler**Ek A. Tarım Ürünleri Üretim Miktarları (Ton)**

Yıl	Buğday	Arpa	Mısır	Çeltik	Çavdar	Yulaf	Kaplıca	Darı	Mahlut
1990	20000000	7300000	2100000	230000	240000	270000	22000	6200	33000
1991	20400000	7800000	2180000	200000	256000	255000	18500	5000	33000
1992	19300000	6900000	2225000	215000	230000	240000	18000	4100	25000
1993	21000000	7500000	2500000	225000	235000	245000	16000	3950	24000
1994	17500000	7000000	1850000	200000	195000	230000	14000	3600	21500
1995	18000000	7500000	1900000	250000	240000	250000	15000	6000	22000
1996	18500000	8000000	2000000	280000	245000	275000	14000	5750	23000
1997	18650000	8200000	2080000	275000	235000	280000	13400	5300	21600
1998	21000000	9000000	2300000	315000	232000	310000	11000	4700	14000
1999	18000000	7700000	2297000	340000	233000	290000	8800	4600	12000
2000	21000000	8000000	2300000	350000	260000	314000	8600	5300	10560
2001	19000000	7500000	2200000	360000	220000	265000	7000	6700	11650
2002	19500000	8300000	2100000	360000	255000	290000	8000	7200	10000
2003	19000000	8100000	2800000	372000	240000	270000	8200	7000	9000
2004	21000000	9000000	3000000	490000	270000	275000	8500	7000	7500
2005	21500000	9500000	4200000	600000	270000	270000	7400	7200	6700
2006	20010000	9551000	3811000	696000	271000	208787	6341	6955	3971
2007	17234000	7306800	3535000	648000	240540	189099	6977	7094	2826
2008	17782000	5923000	4274000	753325	246521	196099	7361	6995	4126
2009	20600000	7300000	4250000	750000	343330	218286	7524	7171	1673
2010	19674000	7250000	4310000	860000	365560	203870	7675	6772	1100
2011	21800000	7600000	4200000	900000	365750	218040	7018	6253	1005
2012	20100000	7100000	4600000	880000	370000	210000	6565	4759	990
2013	22050000	7900000	5900000	900000	365000	235000	13658	5906	993
2014	19000000	6300000	5950000	830000	300000	210000	6152	6744	827
2015	22600000	8000000	6400000	920000	330000	250000	4700	6219	825
2016	20600000	6700000	6400000	920000	300000	225000	4549	5327	615
2017	21500000	7100000	5900000	900000	320000	250000	6610	4737	495
2018	20000000	7000000	5700000	940000	320000	260000	13071	4397	0
2019	19000000	7600000	6000000	1000000	310000	265000	3006	4765	0
2020	20500000	8300000	6500000	980000	295681	314528	2820	5711	0
2021	17650000	5750000	6750000	1000000	200000	276000	4069	4320	0
2022	19750000	8500000	8500000	950000	273000	365000	3447	4168	0

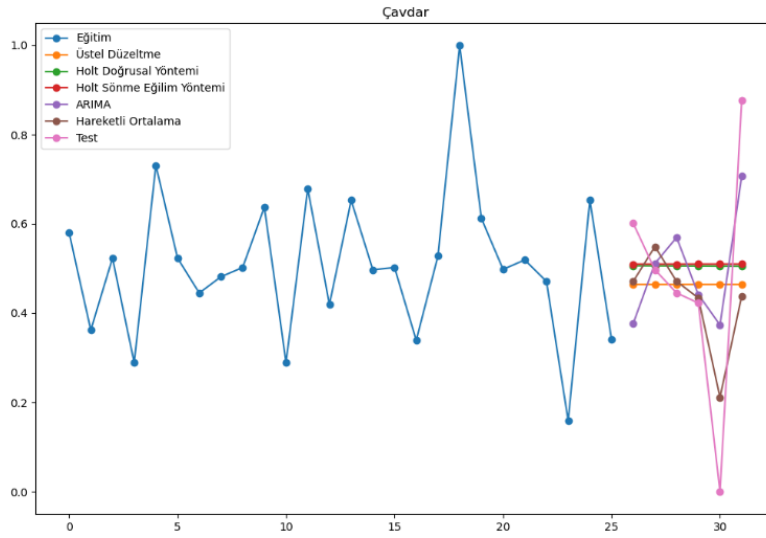
Ek B. Geçerleme için Modellerin Karşılaştırılması



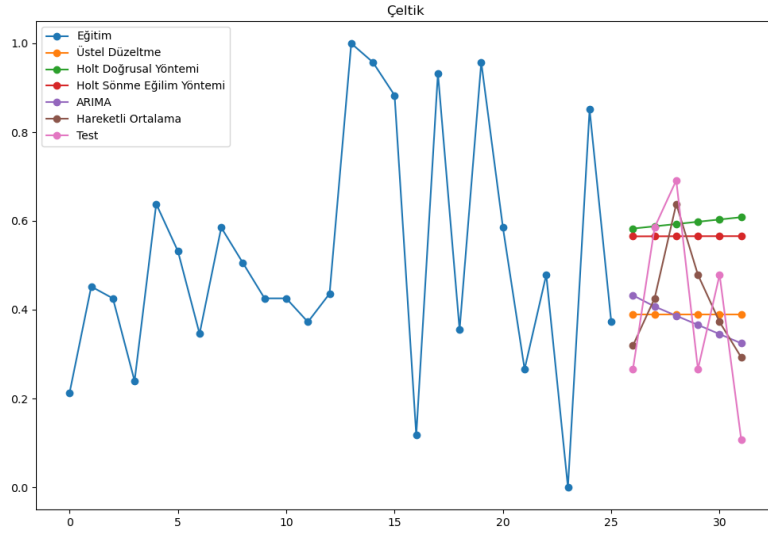
Şekil B1 Geçerleme için Modellerin Karşılaştırılması (Arpa)



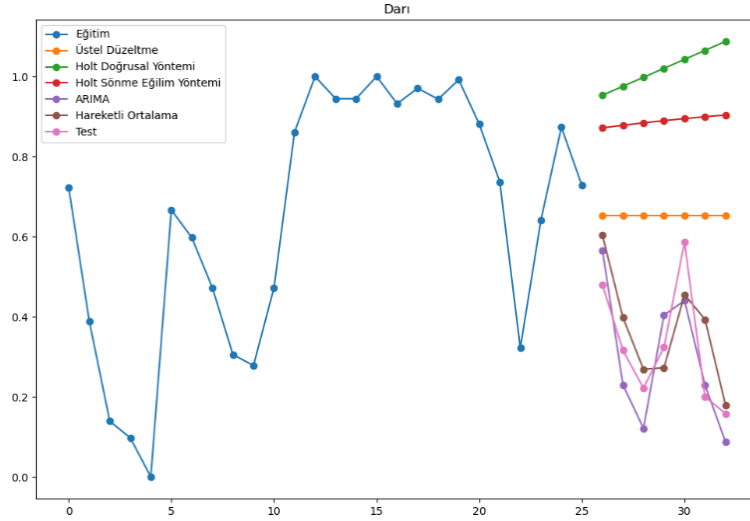
Şekil B2 Geçerleme için Modellerin Karşılaştırılması (Buğday)



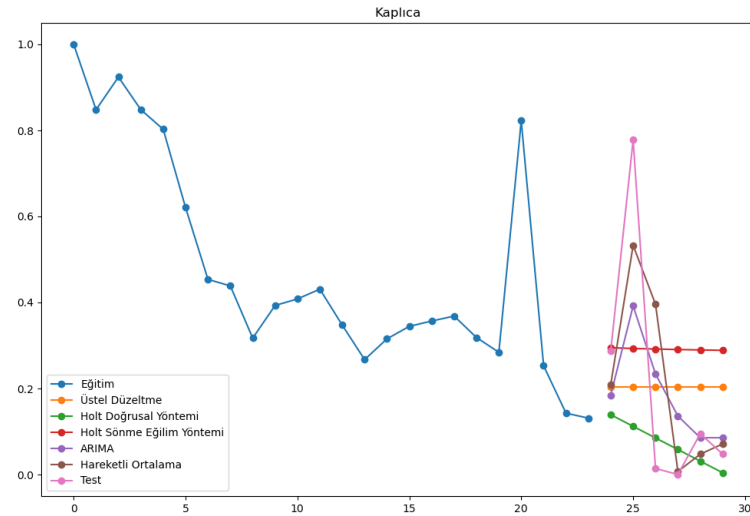
Şekil B3 Geçerleme için Modellerin Karşılaştırılması (Çavdar)



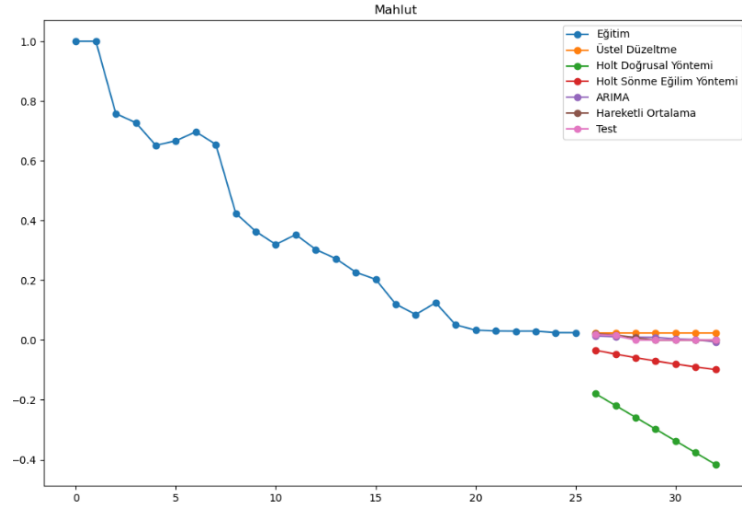
Şekil B4 Geçerleme için Modellerin Karşılaştırılması (Çeltik)



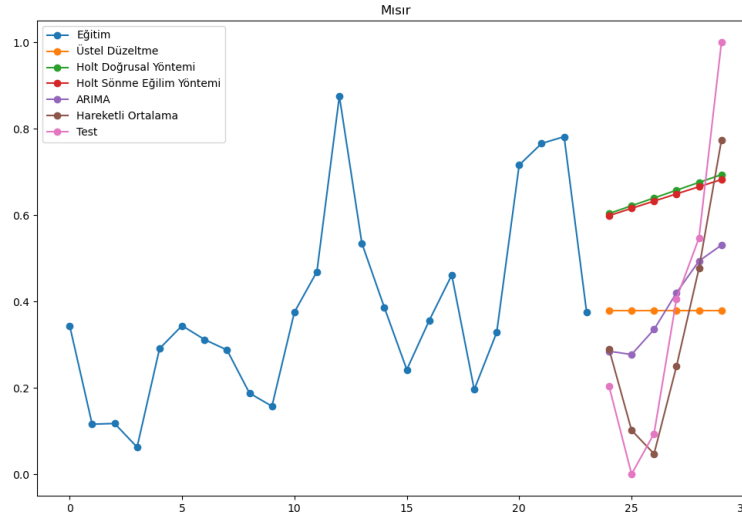
Şekil B5 Geçerleme için Modellerin Karşılaştırılması (Darı)



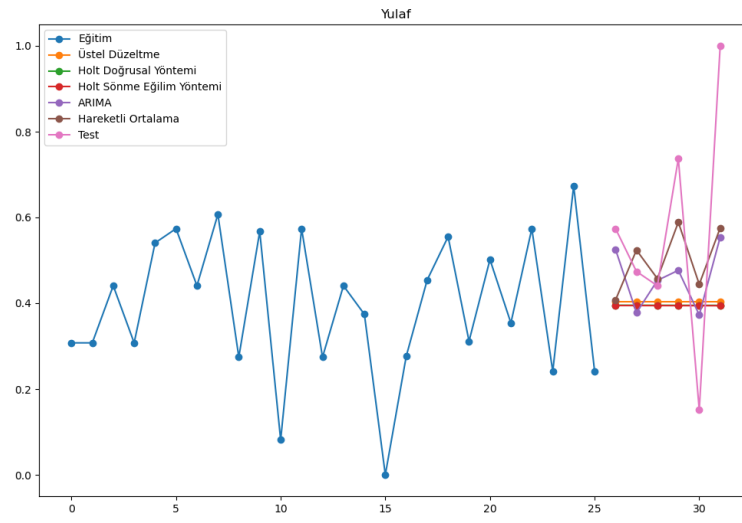
Şekil B6 Geçerleme için Modellerin Karşılaştırılması (Kaplıca)



Şekil B7 Geçerleme için Modellerin Karşılaştırılması (Mahlut)



Şekil B8 Geçerleme için Modellerin Karşılaştırılması (Mısır)



Şekil B9 Geçerleme için Modellerin Karşılaştırılması (Yulaf)

Ek C. 2023-2030 yılları arasındaki tahmin edilen değerleri

Ürün Adı	YIL	Üstel Düzeltme	Holt Doğrusal Yöntemi	Holt Sönme Eğilim Yöntemi	ARIMA	Hareketli Ortalama
ARPA	2023	7515116	7800057	7811926	8882825	7516667
	2024	7515116	7925521	7900488	8939100	7255556
	2025	7515116	8050986	7988165	8543985	7757407
	2026	7515116	8176450	8074964	8564847	7509877
	2027	7515116	8301914	8160896	9190701	7507613
	2028	7515116	8427378	8245969	9269356	7591632
	2029	7515116	8552842	8330190	9799569	7536374
	2030	7515116	8678307	8413570	9959267	7545207
MISIR	2023	3996405	6954712	8520408	8758823	7625000
	2024	3996405	7141237	8574588	8862212	8062500
	2025	3996405	7327761	8628226	9097369	7843750
	2026	3996405	7514286	8681328	9219569	7953125
	2027	3996405	7700810	8733899	9437345	7898438
	2028	3996405	7887334	8785944	9573007	7925781
	2029	3996405	8073859	8837469	9777967	7912109
	2030	3996405	8260383	8888479	9923207	7918945
DARI	2023	5691	4406	3959	3703	4244
	2024	5691	4296	3763	3431	4206
	2025	5691	4185	3568	3432	4225
	2026	5691	4075	3373	3276	4216
	2027	5691	3964	3180	2361	4220
	2028	5691	3853	2988	2097	4218
	2029	5691	3743	2796	1855	4219
	2030	5691	3632	2606	1212	4218
MAHLUT	2023	0	0	0	0	0
	2024	0	0	0	0	0
	2025	0	0	0	0	0
	2026	0	0	0	0	0
	2027	0	0	0	0	0
	2028	0	0	0	0	0
	2029	0	0	0	0	0
	2030	0	0	0	0	0
YULAF	2023	290876	331256	360947	387608	318509
	2024	290876	360151	385530	402150	319836
	2025	290876	389046	409867	409019	334449
	2026	290876	417941	433961	419986	324265
	2027	290876	446835	457814	439692	326183
	2028	290876	475730	481428	467420	328299
	2029	290876	504625	504806	499155	326249
	2030	290876	533519	527950	530498	326910

Ek C. 2023-2030 yılları arasındaki tahmin edilen değerleri (devamı)

Ürün Adı	YIL	Üstel Düzeltme	Holt Doğrusal Yöntemi	Holt Sönme Eğilim Yöntemi	ARIMA	Hareketli Ortalama
ÇELTİK	2023	951969	1122586	928535	966575	975000
	2024	951969	1123660	893219	979743	962500
	2025	951969	1124734	858256	1000123	968750
	2026	951969	1125808	823643	1020504	965625
	2027	951969	1126883	789376	1040885	967188
	2028	951969	1127957	755451	1061265	966406
	2029	951969	1129031	721866	1081646	966797
	2030	951969	1130105	688617	1102026	966602
ÇAVDAR	2023	283701	305911	308713	276332	236500
	2024	283701	305268	285965	278749	254750
	2025	283701	304624	263444	275758	245625
	2026	283701	303981	241149	255465	250188
	2027	283701	303338	219076	274498	247906
	2028	283701	302694	197224	274206	249047
	2029	283701	302051	175590	277818	248477
	2030	283701	301408	154173	263906	248762
KAPLICA	2023	3879	2417	2445	4985	3758
	2024	3879	1330	1481	3485	3603
	2025	3879	243	527	3267	3680
	2026	3879	-843	-417	3452	3641
	2027	3879	-1930	-1351	3222	3661
	2028	3879	-3017	-2277	3222	3651
	2029	3879	-4104	-3193	3222	3656
	2030	3879	-5191	-4100	3222	3654
BUĞDAY	2023	19781324	19796765	20756507	18150815	19300000
	2024	19781324	19803102	20625476	19114147	18900000
	2025	19781324	19809439	20495756	19191730	19316667
	2026	19781324	19815776	20367332	19635227	19172222
	2027	19781324	19822112	20240193	19647616	19129630
	2028	19781324	19828449	20114325	19942218	19206173
	2029	19781324	19834786	19989716	19915270	19169342
	2030	19781324	19841123	19866353	20017661	19168381

Studies on antioxidant, anticancer, DNA cleavage activity and GC-MS analysis of the ethanol extracts of *Ecballium elaterium* (L.) A. Rich., plant parts

Uday BEKSRAVI¹, Fatma ÖZTÜRK KÜP^{2*}, Nilgün GÜLER³, Mithat GÜLLÜ², DilekBAHAR⁴

¹Erciyes University Institute of Science, Department of Biology, Kayseri, Türkiye

²Erciyes University, Faculty of Science, Department of Biology, Kayseri, Türkiye,

³Kayseri University, Mustafa Çokırıkçioğlu Vocational School, Department of Chemistry and Chemical Processing Technologies, Kayseri, Türkiye

⁴Erciyes University, Betül-Ziya Eren Genome and Stem Cell Center (GENKOK), Kayseri, Türkiye

(Alınış / Received: 07.05.2024, Kabul / Accepted: 22.07.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.08.2024)

Anahtar Kelimeler

Ecballium elaterium,
Cucurbitacin,
biyolojik aktivite,
antioksidan,
antikanser,
pBR322 DNA

Abstract: *Ecballium elaterium* is a native species of the south of Europe and the Mediterranean catchment, occasionally cultivated for its use as a medicinal plant. In this study, it was investigated to phytochemicals profiles, cucurbitacin content, antioxidant, DNA cleavage properties and anticancer activity of *E. elaterium* seed, fruit peel and juice ethanol extracts. Phytochemical components of all extracts were determined by the phytochemical analysis methods. Quantitative cucurbitacin content was determined by GC-MS, the free radical scavenging activity of the extracts was determined by the DPPH method, separation ability on pBR322 DNA was determined by agarose gel electrophoresis and cytotoxic effects were determined by MTT analysis on the HepG2 liver cancer line. Phytochemical and GC-MS analysis results indicate cucurbitacins containing glycoside molecules that can be evaluated as a drug in the structure of the plant. The highest cucurbitacin content of 3.73 % was found in *E. elaterium* fruit peel. DPPH activity of juice, fruit peel and seed extracts were determined to be 29.39%, 54.12%, and 79.45%, respectively at the highest concentration. All of the extracts effected on the superhelix structure of plasmid DNA. There was a decrease in the viability of HepG2 liver cancer cells due to the increased concentration. After 48 hours of incubation, IC₅₀ values for juice, fruit peel and seed extracts were determined as 309.02 µg/ml, 525.43 µg/ml and 549.54 µg/ml, respectively. It seems that *E. elaterium* juice, fruit peel and seed extracts have promising potential as future natural anticancer agents in the food industry..

Ecballium elaterium (L.) A. Rich bitki parçalarının etanol ekstraktlarının antioksidan, antikanser, DNA ayırma aktivitesi ve GC-MS analizi üzerine çalışmalar

Keywords

Ecballium elaterium,
Kukurbitasin,
antioksidan,
antikanser,
pBR322 DNA

Öz. *Ecballium elaterium*, Avrupa'nın güneyinde ve Akdeniz havzasında bulunan yerli bir türdür ve bazen tıbbi bitki olarak kullanılmak üzere yetiştirilir. Bu çalışmada *E. elaterium* tohumu, meyve kabuğu ve meyve suyu etanol ekstraktlarının fitokimyasal profilleri, cucurbitacin içeriği, antioksidan, DNA ayırma özelliği ve antikanser aktiviteleri araştırıldı. Tüm ekstraktların fitokimyasal bileşenleri fitokimyasal analiz yöntemleriyle gerçekleştirildi. Kantitatif kukurbitasin içeriği GC-MS, ekstraktların serbest radikal temizleme aktivitesi DPPH yöntemiyle, pBR322 DNA üzerindeki ayırma özelliği agaroz jel elektroforezi ve sitotoksik etkileri HepG2 karaciğer kanseri hattı üzerinde MTT analizleri ile belirlendi. Fitokimyasal ve GC-MS analiz sonuçları bitkinin yapısında ilaç olarak değerlendirilebilecek glikozit molekülleri içeren kukurbitasinlerin varlığına işaret etmektedir. En yüksek cucurbitacin içeriği %3,73 ile *E. elaterium* meyve kabuğunda bulunmuştur. Meyve suyu, meyve kabuğu ve tohum ekstraktlarının DPPH aktivitesinin en yüksek konsantrasyonda sırasıyla %29,39, %54,12 ve %79,45 olduğu belirlendi. Ekstraktların tümü plazmid DNA'nın

süperheliks yapısı üzerinde etkili olmuştur. Konsantrasyon artışına bağlı olarak HepG2 karaciğer kanseri hücrelerinin canlılığında azalma meydana gelmiştir. 48 saatlik inkübasyonun ardından meyve suyu, meyve kabuğu ve tohum ekstraktlarının IC50 değerleri sırasıyla 309,02 µg/ml, 525,43 µg/ml ve 549,54 µg/ml olarak belirlendi. *E. elaterium* meyve suyu, meyve kabuğu ve tohumunun gıda endüstrisinde gelecekteki doğal antikanser ajanları olarak umut verici bir potansiyele sahip olduğu görülmektedir.

*İlgili Yazar, email: fozturk@erciyes.edu.tr

1. Introduction

Plants are one of the most important sources of natural remedies used in traditional therapy methods. Since the bioactive substances in plants are very rich and effective, the variety of plants that can be used as herbal medicine has increased rapidly between scientific environments. Medicinal plants and herbal medicines are widely used in traditional cultures worldwide, and are becoming increasingly popular as natural options to artificial chemicals in the modern lifestyle [1].

Phytochemicals, which are useful in the treating of some diseases with their individual or synergistic effects, are of vital in developing of new drugs and preparing therapeutic agents in the pharmaceutical industry. [2,3]. Screening of plant extracts, which are natural sources, in the developing of new drugs, is a new approach to finding therapeutically active ingredients. [4,5]. Phytochemicals such as flavonoids, tannins, saponins, alkaloids and terpenoids have many biological properties, including antioxidant, anti-inflammatory, anti-diarrheal, anti-ulcer and anticancer activities. [5].

Ecballium elaterium (L.) A. Rich, known as 'squirting cucumber' from the Cucurbitaceae family, is abundant in the Mediterranean region and its fruit juice is used by the public in to treat of sinusitis in Anatolia [6]. All cucurbit species produce a class of triterpenoids known as cucurbitacins. Cucurbitacins, derived from the cucurbitane skeleton, are a group of tetracyclic triterpenoids found mainly in the Cucurbitaceae family. Triterpenoids, found in free or glycosidic form, give the plant a hot taste and are probably produced as a defense mechanism against pests [7]. These molecules are known to possess a broad spectrum of pharmacological activities such as anti-inflammatory, antipyretic, anticancer, analgesic, antimicrobial, antitumor, immunomodulatory, and hepatoprotective activities [8-11].

The aim of our study is to determine the cytotoxic effects of *E. elaterium* fruit peel, seed and juice by detecting the phytochemical content, especially cucurbitacins, using GC-MS analysis. Also, in study the antioxidant activity of the plant extract and its cleavage effect on pBR322 plasmid DNA were investigated. Our study will contribute to the developing new strategies for using of herbal resources to prevent, prevent, delay or cure cancer.

2. Material and Method

2.1. Plant extraction and fractionation

E. elaterium plant samples were collected from Istanbul province between October and November 2019. Fruit peel, juice and seed parts of the plant were used. Seed, fruit peel and juice ethanol extracts of *E. elaterim* were prepared according to the method of Adwan et al. (2011) [11].

Fruits peels were homogenized and dried in an incubator at 37 °C. Exposure to light was avoided to prevent loss of effective ingredients. The samples were then mixed well with magnetic stirrer in 80% ethanol for 24 hours at room temperature. The insoluble materials were centrifuged at 10000 rpm at 4 °C for 10 minutes. Then the liquid was evaporated in the oven at 37 °C.

Seed samples were dried at room temperature before extraction, and the same process was performed. The juice was drawn directly, mixed in 80% ethanol and left for one day at room temperature. Centrifugation was then carried out at 10000 rpm for 10 minutes at 4 °C. Extracts were kept in the refrigerator at 4 °C.

2.2. GC-MASS analysis of *E. elaterium* extracts

Gas chromatography-mass spectrometry (GC/MS) was used for quantitatively analyze of *E. elaterium* seeds, fruit and juice ethanol extracts. The analysis was performed using a GC (SHIMADZU 2010 Plus) interfaced with a mass select or detector (MSD, SHIMADZU QP2010 Ultra) equipped with a polar Rtx-5ms (5% phenylmethylpolysiloxane) capillary column (30 m × 0.25 mm id and 0.25 µm film thickness). Helium with a linear velocity of 1.15 ml/min was used as the carrier gas. The components were identified by comparing the mass spectra and retention times with those of the organs and the computer mapping with the NIST and WILEY library, and the fragmentation model of mass spectral data. GC/ MS analysis was done in Erciyes University Technology Research and Application Center (TAUM).

2.3. Phytochemical analysis of *E. elaterium* extracts

To obtain more details about the composition of *E. elaterium*, the following qualitative analyses were made according to the Teli et al. (2017) method [12].

Saponin and Tannin Test: 1 ml extract was placed in the test tube and vigorously mix with vortex. If foam formation is observed in the tube, the presence of saponin in the extract will be determined.

Phenol and Tannin Test: By adding 2 ml of 2% FeCl₃ solution onto 1 ml of extract and mix, if the formation of a blue-green or black color in the mixture is observed. The formation of these colors indicates the presence of phenol and tannin in the extract.

Terpenoids Test: 2 ml of chloroform and 2 ml of concentrated sulfuric acid were mixed on 1 ml of plant extract. Formation of a red intermediate phase indicates the presence of terpenoids in the extract.

Flavonoids Test: 1 ml extract was mixed with some zinc powder and concentrated hydrochloric acid was added drop by drop. The observation of a red color after a few minutes indicates the presence of flavonoids in the extract.

Glycoside Test: The mixture obtained by adding 2 drops of 2 % FeCl₃ to 1 ml of glacial acetic acid was mixed with to 1 ml of extract and transferred to the tube containing 2 ml of concentrated sulfuric acid. Formation of a brown ring in the intermediate phase indicates the presence of glycoside in the extract.

2.4. Antioxidant activity determination of *E. elaterium* extracts

The antioxidant activity of *E. elaterium* fruit peel, seed and juice extracts was evaluated using the 2,2'-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) free radical scavenging assay. The method is based on the measurement of the colour change in the characteristic purple colour of the radical using a spectrophotometer at a wavelength of 517 nm [13] Briefly, dilutions of 30, 15, 7.5, 3.75, 1.87, 0.93, 0.46 and 0.23 mg/ml concentrations of *E. elaterium* fruit peel, seed and juice extracts were prepared and 50 µl of these dilutions were taken into test tubes. After adding 1 ml of 0.1 mM DPPH radical prepared with methanol, it was mixed with vortex and keep at room temperature for 2 hours in the dark. The same process was repeated simultaneously for a blind tube containing solvent instead of compound. The absorbance values of the mixtures were read on a 517 nm wavelength in spectrophotometer. Measurements were repeated three times for each compound and the results averaged. The free radical scavenging effect of the solutions is indicated as % inhibition of DPPH absorption.

This value is calculated according to the formula:

Radical removal activity (% Inhibition) = $[100 \times (A \text{ control} - A \text{ sample}) / A \text{ control}]$.

IC₅₀ values (indicating the concentration of the extract (mg/mL) providing 50% radical scavenging) were calculated from the graph plotted scavenging percentage against extract concentration.

2.5. DNA cleavage activity on pBR322 plasmid DNA of *E. elaterium* extracts

Agarose gel electrophoresis was used to observe the effects of *E. elaterium* extract on pBR322 plasmid DNA [14]. 3 µl plasmid DNA (0.5 µg / ml) was added over 30 µl of fruit peel, juice and seed ethanol extracts prepared at different concentrations (100, 50, 25, 12.5 and 6.25 ppm). Samples were incubated at 37 °C for 24 hours in a dark place. After incubation, 10 µl of the sample-DNA mixture was mixed with loading buffer and loaded into 1% agarose gel, and electrophoresis was performed for 2 hours at 60 V in TAE buffer. After electrophoresis, gels were stained with ethidium bromide (0.5 µg/ml) and photographs were taken in the imaging system. Experiments were

done in three replications.

2.6. Cytotoxic effect of *E. elaterium* ethanol extracts

In order to assess the cytotoxicity of *E. elaterium* the MTT assay was used [15]. We tested ethanol extracts of plant on HepG2 (Human, Liver cancer cell line, Epithelial-like, hepatocellular carcinoma) cell line. The number of cells required for the test was calculated and the cells were cultured until they reached this number. Cells were cultured on high glucose DMEM (Sigma, USA) medium containing 10% FBS (Biological Industries, USA), 1% L-glutamine (Biological Industries, USA) and 1% Penicillin Streptomycin (Biological Industries, USA). When the cells reached a sufficient number, they were washed two times with PBS (Biological Industries, USA) and incubated with 0.05% Trypsin-EDTA (Biological Industries, USA) for 5 minutes to leave the flask. Cells taken from the flask after incubation were placed in sterile conical-based centrifuge tubes and centrifuged at 350xg for 5 minutes. The cell pellet obtained was resuspended again with the culture medium.

Cell numbers were then calculated and cultivated in 96-well culture dishes based on "F", where MTT testing would be performed, with 3×10^3 cells per well. Culture medium was added to each well with 200 μ l and incubated in a 37 °C CO₂ incubator. The next day, the cells were examined under an inverted light microscope, when the cells were found to be adherent, plant extracts of different concentrations (1000, 500, 250, 125, 62.5, 31.25 μ g/ml) were added to the cells. Extracts were incubated with cells for 48 hours. At the end of 48 hours, MTT salt was prepared with PBS and after sterilization it was added to the cells so that the final concentration was 0.5 mg/ml. Cells incubated with MTT for 4 hours were examined under an inverted light microscope and the medium on the cell was carefully aspirated when the formation of formazan crystals was seen. Then 100 μ l of DMSO was added to each well and incubated in the dark to dissolve the formazan crystals formed for 15 minutes. At the end of 15 minutes, 96-well culture vessels were read at 560 nm in an ELISA reader (Promega, Glomax) to read the purple color formed by dissolving formazan crystals. Each experiment was performed in 3 replications as an independent set. As the negative control in the experimental setup, plant extracts were not added to the determined wells. While the absorbance of the cells used in the negative control is considered 100% alive, the ratio of the absorbance in other wells to this absorbance gave the percent viability of the cells in that well.

3. Results and Discussion

3.1. GC-MS analyses the results of extracts

GC-MS showed chromatograms obtained as a result of the cucurbitacin content of *E. elaterium* seed, fruit peel and fruit juice ethanol extracts. As a result of scanning the analysis results in the WILEY database, the names of the possible main and other compounds in the Table 1. According to this screening result, Cucurbitacin B as the main compound has been detected in fruit peel and fruit juice extracts, but not in seed extract. Other substantial compounds detected in all extracts: Saturated fatty acids, unsaturated fatty acids, fatty esters, glycosides, diterpenoids, diterpene, glycerolipids and organic compounds.

Table 1. Bioactive compounds found in ethanol extract of *E. elaterium* seed, fruit peel and juice

Compound Name	Molecular formula	Classification	RT Time			Field%		
			Fruit Peel	Seed	Juice	Fruit Peel	Seed	Juice
Ethyl alpha-d-glucopyranoside	C ₈ H ₁₆ O ₈	Glycosides	11.7			37.28		
Tetradecanoic acid	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	Saturated fatty acid	13.1		13.1	2.65		0.84
Pentadecanoic acid	C ₁₅ H ₃₀ O ₂	Saturated fatty acid	14.2			0.99		
Hexadecanoic acid, methyl ester (Methyl palmitate)	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	fatty acid methyl ester	14.8			0.84		0.26

n-Hexadecanoic acid (Palmitic Acid)	C ₁₆ H ₃₂ O	Saturated fatty acid	15.2	15.2		17.73	30.61	19.42
Hexadecanoic acid, ethylester (Ethyl palmitate)	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	fatty acid ethyl ester	15.5	15.5		3.71	3.23	1.84
9-Octadecanoic acid, methylester (Elaidic acid)	C ₁₉ H ₃₆ O ₂	unsaturated trans fatty acid	16.6			8.47		
Methyl stearate	C ₁₉ H ₃₆ O ₂	fatty acid methylester	16.8			1.77		
Octadecanoic acid (stearic acid)	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	Saturated fatty acid	17.2	17.2		5.22	13.00	
Cucurbitacin B, dihydro -	C ₃₂ H ₄₈ O ₈	Triterpenoids	19.3		20.5	3.73		1.54
1-Heptacosanol	C ₂₇ H ₅₆ O	primary fatty alcohol	21.3			13.76		
9-Octadecenoic acid (Z)	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	unsaturated fatty acid		14.2	14.2		1.11	0.51
Heptadecanoic acid	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	saturated fatty acid		16.2	16.2		1.19	0.61
9,12-Octadecadienoic acid (Z, Z)	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	unsaturated fatty acid		17.0	17.0		7.89	3.24
9,12,15-Octadecatrienoic acid, (Z, Z, Z)	C ₃₆ H ₆₀ O ₄	unsaturated fatty acid		17.1	17.0		14.13	11.50
Octadecanoic acid, ethylester	C ₂₀ H ₄₀ O ₂	fatty acid ethyl ester		17.5			4.20	
Hexadecanoic acid, 2- hydroxy-1- (hydroxymethyl) ethyl ester	C ₁₉ H ₃₈ O ₄	Fatty esters		20.3			6.24	
Octadecanoic acid, 2,3-dihydroxypropyl ester	C ₂₁ H ₄₂ O ₄	Fatty esters		22.1	22.2		1.66	11.95
Oxalic acid, cyclohexylpentyl ester	C ₁₃ H ₂₂ O ₄	Fatty esters			5.1			3.17
n-Decanoic acid	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	Unsaturated fatty acids			8.0			2.90
Apocynin	C ₉ H ₁₀ O ₃	Phenolic acids			9.8			0.33
Undecanoic acid	C ₁₁ H ₂₂ O ₂	Unsaturated fatty acids			10.7			0.26
Methyl beta-D-galactopyranoside	C ₇ H ₁₄ O ₆	Monosaccharides			11.6			1.37
Tetradecanoic acid	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	saturated fatty acid			13.1			0.84
Neophytadiene	C ₂₀ H ₃₈	diterpene			13.9			0.30

2-Pentadecanone, 6,10,14-trimethyl	C ₁₈ H ₃₆ O	Diterpenoids			14.0			0.30
Oleic Acid	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	Unsaturated fattyacids			15.1			0.42
Octadecanoic acid	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	Unsaturated fattyacids			17.2			10.20
Heptadecanoic acid, ethyl ester	C ₁₉ H ₃₈ O ₂	Fatty esters			17.5			2.23
Hexadecanoic acid, 2-hydroxy-1-(hydroxymethyl) ethyl ester	C ₁₉ H ₃₈ O ₄	Fatty esters			20.3			17.74
9,12-Octadecadienoic acid (Z, Z) -, 2,3-dihydroxypropyl ester	C ₂₁ H ₃₈ O ₄	Glycerolipids			21.9			2.01
Octadecanoic acid, 2,3-dihydroxypropyl ester	C ₂₁ H ₄₂ O ₄	Glycerolipids			22.2			11.95

2.7. Phytochemical analyses result of *E. elaterium* extracts

In the qualitative phytochemical content analysis, it was determined that the extracts contain glycosides and terpenoids but not saponins, phenols, and flavonoids. As seen in Table 2, it has been qualitatively determined that there are no phenolic, flavonoid structures in the ethanol extracts of the seed, fruit and juice parts of the *E. elaterium* plant, but only dense glycoside, terpenoid structures.

Table 2: Phytochemical contents of *E. elaterium* by qualitative analysis

<i>E. elaterium</i>	Saponin	Phenol-Tannin	Terpenoids	Flavonoids	Glycosides
Seed	----	----	----	----	----
Fruit	----	----	+	----	+
Juice	----	----	+	----	+

---: Absence + : Present

2.8. Antioxidant activity of *E. elaterium* extracts

We used DPPH free radical to determine the free radical scavenging activities of *E. elaterium* fruit, seed and juice ethanol extracts. The result showed an increase in free radical scavenging activity due to the increase in concentration. The free radical removal activity of the juice extract was the highest compared to the control (Figure 1). The % inhibition values of BHT, fruit, seed and juice extracts at the highest concentration (30 mg/ml) in free radical removal activity were calculated as 98.78%, 29.39%, 54.12%, and 89.45%, respectively. The concentration causing 50 % inhibition (IC₅₀) of the extracts was determined. Among the extracts studied, *fruit* (IC₅₀=53,48 mg/ml) had the lowest antiradical activity, while juice (IC₅₀=11,12 mg/ml), and seed (IC₅₀=25,54 mg/ml) were found to have the highest antiradical capacity (p<0.05). That agrees with the studies conducted by Gaballa et al. (2017), Felhi et al. (2017) and Bourebaba et al. (2020), who showed using DPPH assay that *E. elaterium* extracts have an antioxidant effect [16-18].

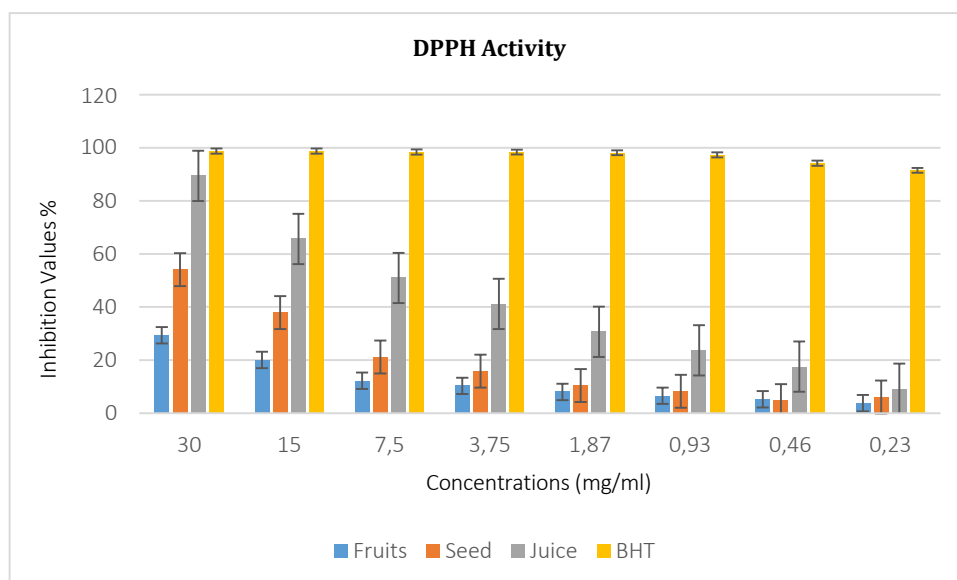


Figure 1. Free radical removal activity results of *E. elaterium* extracts

2.9. DNA interaction of *E. elaterium* extract

According to the results of DNA interaction studies examined by agarose gel electrophoresis method, *E. elaterium* fruit, seed and juice ethanol extracts were found to have a separating effect on plasmid DNA (Fig.2). All of the extracts affected on the uncoiling of the supercoiled plasmid DNA structure. There was a decrease in form I density and an increase in form II density. In addition, the formation of the linear DNA structure was determined by observing the Form III structure (Figure 2). Therefore, *E. elaterium* fruit, juice and seed ethanol extracts affect on DNA. These results agree with Abu-Hijleh et al. (2018) study that evaluated the genotoxic effects of *E. elaterium* fruit and leaf ethanol extracts [19]. These effects were determined using ERIC-PCR and SDS-PAGE. It showed a change in the DNA and protein profiles of *Escherichia coli* strains compared to control extracts. These changes were among the decreased or increased intensity of some bands, the absence or appearance of newly amplified fragments [20].

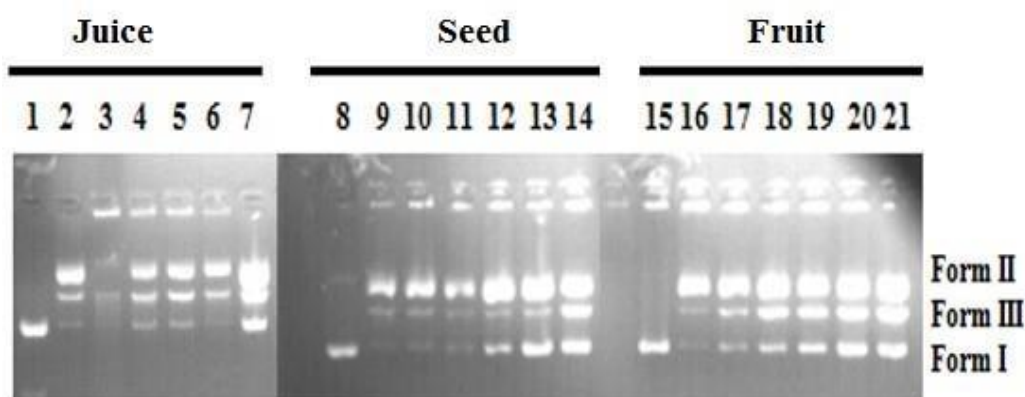


Figure 2. *E. elaterium* extracts-DNA interaction results: (1-8-15) 10% pBR322 DNA control, (2-9-16) 100 ppm, (3-10-17) 50 ppm, (4-11-18) 25 ppm, (5-12-19) 12.5 ppm, (6-13-20) 6.25 ppm, (7-14-21) 3.125 ppm.

2.10. Cytotoxic effect of *E. elaterium* extract

Cytotoxic effects of *E. elaterium* seed, fruit and juice extracts were determined using MTT assay. In the study HepG2 liver cancer line were used. The cytotoxic effect of ethanol extracts of *E. elaterium* plant parts on human liver cancer line (HepG2) is shown in Figure 3. Results determined that there is a decrease in the viability of HepG2 liver cancer cells due to increasing concentrations of *E. elaterium* ethanol extracts, especially seed extract has a greater effect on cell viability. As a result of the study, it was determined that juice, fruit and seed extracts caused a decrease in cell viability due to increasing concentrations. Cell viability of juice, fruit and seed extracts at the highest concentration of 1000 µg/ml was determined as 59.49%, 67.68% and 59.49%, respectively. The inhibitory effect of tumor cell proliferation was dose-dependent with a half-maximal inhibition (IC₅₀) of 309.02µg/ml, 525.43µg/ml and 549.54 µg/ml for juice, fruit and seed extracts respectively after 48-h incubation.

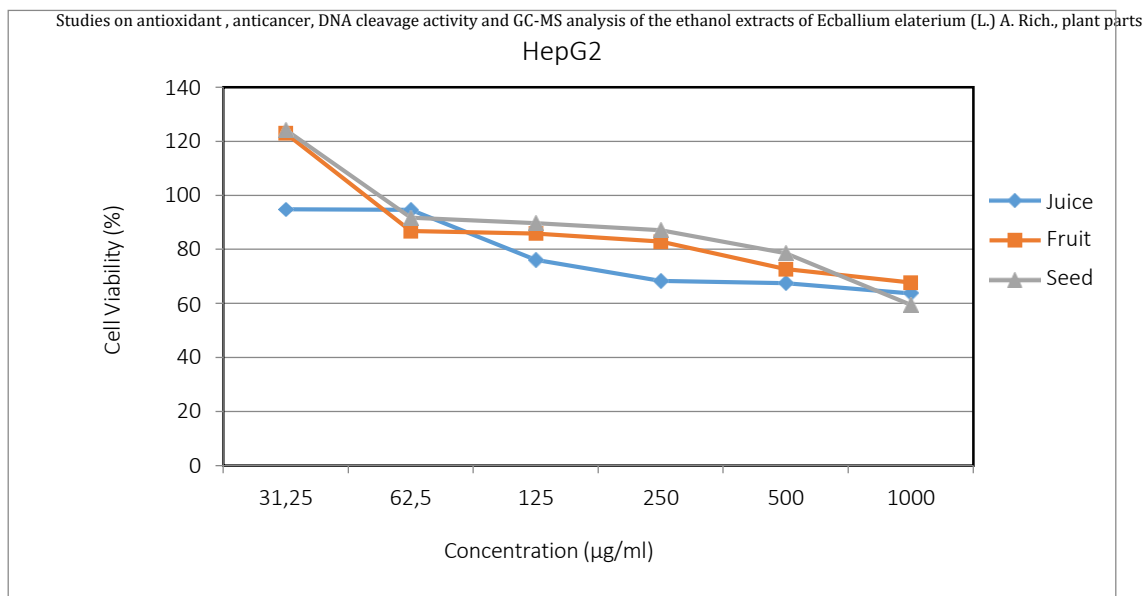


Figure 3. Cytotoxic activity of *E. elaterium* extracts on human liver cancer line (HepG2)

Ljubuncic et al. (2005) have previously reported the cytotoxic effect of an aqueous extract of *E. elaterium* on cell line with an IC_{50} of 1,000 µg/ml at 48-h incubation [20]. This concentration is close to IC_{50} value of the extract on the HepG2 cell line in our study (for fruit extract 525.43µg/ml at 48-h incubation).

Their results agree with Touihri et al (2019) study that determined that the seed oil had a strong antiproliferative effect on human colon adenocarcinoma (HT29) and fibrosarcoma (HT1080) cell lines [21]. The presence of glycoside (glucose ester, ether structures) detected in the extracts as a result of phytochemical analysis is compatible with the presence of cucurbitacin in the GC-MASS analysis. The decrease in cell viability in the HepG2 cell line, based on increasing concentration, indicates that the extract will show the anticancer activity of cucurbitacin B [22] (Berbard et al. 2010).

Similar results Karimi et al. (2016), Barakati et al. (2016), Bohlooli et al. (2012) and Hamidi et al. (2020) who tested *E. elaterium* extracts against gastric cell line (AGS), human brain cancer cell line (U87), AGS (human gastric carcinoma) and KYSE30 (human esophageal squamous cell carcinoma), (MCF-7, MDA-MB-468 and MKN-45) cancer cell lines respectively [23-26]. Their results agree with our results and demonstrate the cytotoxicity of *E. elaterium* against various cancer cell lines. In light of the data revealed by this study, it is necessary that the studies can be made more specific by purifying the cucurbitacin B containing glycoside structure with more specific, exact analyses to optimize the active ingredients and especially to observe the results of in vivo experiments in order to use *E. elaterium* against cancer.

3. Conclusion

This study provides an overview of the chemical composition and biological activity of juice, fruit and seed ethanol extract of *E. elaterium*. According to the results of the current study, cucurbitacin B, which is considered the most effective component in the *E. elaterium* plant, was detected in fruit peel and fruit juice extracts. It was determined that fruit juice, fruit and seed ethanol extract of *E. elaterium* showed antioxidant activity and nuclease activity on

DNA. It has also been determined that the extracts have a cytotoxic effect on liver cancer cell lines by reducing cell viability. According to the results, it is thought that fruit juice, fruit and seed ethanol extracts of *E. elaterium* can be used as anticarcinogenic agents.

Acknowledgment Thanks to Erciyes University Technology Research and Application Center (TAUM) for GC-MS analysis.

Declaration of competing interest

The authors declare no conflict of interest, financial or otherwise.

REFERENCES

- [1] Allkin B. Useful Plants – Medicines: At Least 28,187 Plant Species are Currently Recorded as Being of Medicinal Use. In: Willis KJ, editor. State of the World's Plants 2017. London (UK): Royal Botanic Gardens, Kew; 2017. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK464488/pdf> (Accessed: February 2020).
- [2] Patel, D.K., 2015. Plant as a source of medicine, Medicinal & Aromatic Plants.; S3-e001(2015).
- [3] Nisha, K., Darshana, M., Madhu, G., Bhupendra, M. K. 2011. GC-MS analysis and anti- microbial activity of *Psidium guajava* (leaves) grown in Malva region of India, International Journal of Drug Development and Research, 3(4) (2011), 237–245.
- [4] Gopalakrishnan, K., Udayakumar, R., 2014. GC-MS analysis of phytochemicals of leaf and stem of *Marsilea quadrifolia* (L). International Journal of Biochemistry Research & Review. 4(6)(2014), 517–526.
- [5] Starlin, T., Prabha, P. S., Thayakumar, B. K. A., Gopalakrishnan, V. K. 2019. Screening and GC-MS profiling of ethanolic extract of *Tylophora pauciflora*, Journal of Biomedical Informatics. 15(6) (2019), 425–429.
- [6] Sezik, E. 1997. Research on the Turkish medicinal plant *Ecballium elaterium*. Chemistry of Natural Compounds. 33 (1997) 541-542.
- [7] Rios, J. L., Escandell, J. M., Recio, M. C. 2005. New insights into the bioactivity of cucurbitacins. Studies in Natural Products Chemistry, 32 (2005), 429–469.
- [8] Öztürk M, Altundağ, Günel S, 2011, Medicinal and aromatic plants(Turkey), in Ethnopharmacology section, Biological, Physiological and Health Sciences, Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS) ,Developed under the Auspices of the UNESCO, EOLSS Publishers, Oxford, UK, (<http://www.eolss.net>) (accessed Apr 30 2024).
- [9] Attard, E. 2010. Squirting cucumber seeds: use of extracts from *Ecballium elaterium* seeds in health in Nuts and Seeds in Health and Disease Prevention, eds. V.R. Preedy, R.R. Watson & V.B. Patel, 1st edn, Elsevier Inc., USA, 1400s.
- [10] Costich, D. E. 1997. *Ecballium elaterium*: the squirting cucumber of the Mediterranean, Plant Genetic Resources Newsletter. 112 (1997), 98-99.
- [11] Adwan, G., Salameh, Y., Adwan, K. 2011. Effect of ethanolic extract of *Ecballium elaterium* against *Staphylococcus aureus* and *Candida albicans*. Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine, 6(2011), 456-60.
- [12] Teli, M. D., Pandit, P. 2017. Multifunctionalised Silk Using *Delonix regia* Stem Shell Waste. Fibers and Polymers, 18 (2017),1679-1690.
- [13] Lee, J. S., Kim, G. H., Lee, H. G. 2010. Characteristics and antioxidant activity of *Elsholtzia splendens* extract-loaded nanoparticles. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 58 (2010), 3316-3321.
- [14] Gümüş, F., Eren, G., Açık, L, Çelebi, A., Öztürk, F., Yılmaz, S., Ilıkçı Sağkan, R., Gür, S., Özkul, A., Elmalı, A., Elerman, Y. 2009. Synthesis, cytotoxicity, and DNA interactions of new cisplatin analogues containing substituted Benzimidazole ligands. Journal of Medicinal Chemistry, 52 (2009), 1345-1351.
- [15] Jafargholizadeh, N., Zargar, S., Yassa, N., Tavakoli, S. 2016. Purification of Cucurbitacins D, E, and I from *Ecballium elaterium* (L.) A. Rich fruits and study of their cytotoxic effects on the AGS cell line. Asian Pacific Journal of Cancer Prevention, 17 (2016), 4631-4635.
- [16] Gaballa, H., Wahba, M., Naroz, M. 2017. Antioxidant and insecticidal effect of squirting cucumber, *Ecballium elaterium* extracts against *Aphis craccivora* and *Phthorimaea operculella*". Journal of Entomology and Zoology Studies, 5 (2017), 1980-1985.
- [17] Felhi, S., Daoud, A., Hajlaoui, H., Mnafigui, K., Gharsallah, N., Kadri, A. 2017. Solvent extraction effects on phytochemical constituents' profiles, antioxidant and antimicrobial activities and functional group analysis of *Ecballium elaterium* seeds and peels fruits. Journal of Food Science and Technology, (2017), 37483-374492.
- [18] Bourebaba, L., Gilbert-Lo'pez, B., Oukil, N., Bedjou, F., 2018. Phytochemical composition of *Ecballium elaterium* extracts with antioxidant and antiinflammatory activities: Comparison among leaves, flowers and fruits extracts. Arabian Journal of Chemistry, 13 (2018), 3286-3300.

- [19] Abu-Hijleh, A., Adwan, G., Abdat, W. (2018) Biochemical and Molecular Evaluation of the Plant *Ecballium elaterium* extract effects on *Escherichia coli*. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*, 19(2018), 1-11.
- [20] Ljubuncic, P., Azaizeh, H., Portnaya, I., Cogan, U., Said, O., Saleh, K.A., Bomzon, A. (2005) Antioxidant activity and cytotoxicity of eight plants used in traditional Arab medicine in Israel. *Journal of Ethnopharmacology*, 99 (2005), 43-47.
- [21] Touihri, I., Kallech-Ziri, O., Boulila, A., Fatnassi, S., Marrakchi, N., Luis, J., Hanchi, B. *Ecballium elaterium* (L.) A. Rich seed oil: Chemical composition and antiproliferative effect on human colonic adenocarcinoma and fibrosarcoma cancer cell lines. *Arabian Journal of Chemistry*, 12 (2011), 2347-2355.
- [22] Bernard, S. A., Olayinka, O.A. (2010) Search for a novel antioxidant antiinflammatory/analgesic or anti-proliferative drug cucurbitacins hold the ace. *Journal of Medicinal Plants Research*, 4 (2010), 2821-2826.
- [23] Karimi, N., Bohlooli, S., Mazani, M. 2016. Nanoliposomal formulation of *Ecballium elaterium* extract: Cytotoxic Evaluation against Human Gastric Adenocarcinoma (AGS) Cell Line. *Journal of Nanomedicine Research*, 1(1) (2016), 9-14.
- [24] Barakati, I., Zir,i O., Boulila, A., Khwaldia, K., Marrakchi, N., Hanchi, B., Hosni, K., Luis, J. 2016. Targetting avb3 and a5b1 integrins with *Ecballium elaterium* (L.) A. Rich. seed oil. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 84 (2016), 1223-1232.
- [25] Bohlooli, S., Jafari, N., Jahed, S. 2012. Cytotoxic effect of freeze-dried extract of *Ecballium elaterium* fruit on gastric adenocarcinoma (AGS) and esophageal squamous cell carcinoma (KYSE30) Cell Lines. *Journal of Gastrointestinal Cancer*, 43(2012), 579-58.
- [26] Hamidi, M., Ghasemi, S., Bighdilou, B., Koohi, D., Yousefbeyk, F. 2020. Evaluation of antioxidant, antibacterial and cytotoxic activity of methanol extract from leaves and fruits of Iranian Squirting Cucumber (*Ecballium elaterium* (L.) A. Rich). *Research Journal of Pharmacognosy.*; 7(1)(2020) 23-29.

DNA Barcoding of Four Lichenized Fungi from Horseshoe Island (Antarctic Peninsula, Antarctica)

Merve Yiğit^{*1}, Mehmet Gökhan Halıcı¹

¹Erciyes University Fen Faculty Biology/KAYSERİ

(Alınış / Received: 08.03.2024, Kabul / Accepted: 10.07.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.08.2024)

Keywords

Antarctica
Biodiversity
DNA barcoding
Horseshoe Island
Lichenized fungi
mtSSU
nrITS

Abstract: In this study, it was aimed to identify four lichenized fungi species from Horseshoe Island which is located in the west of the Antarctic Peninsula and where the temporary Turkish Science Base is located, through their morphological and anatomical properties and DNA barcoding using the *nrITS* or *mtSSU* gene regions. In this direction, DNA barcoding of samples belonging to *Acarospora macrocyclos* Vain., *Rhizocarpon grande* (Flörke ex Flot.) Arnold, *Mastodia tessellata* (Hook. f. & Harv.) Hook. f. & Harv. and *Verrucaria tessellatula* Nyl. species carried out. Within the scope of the study, *nrITS* data were obtained for the first time for *A. macrocyclos* and *R. grande* and *mtSSU* data was obtained for the first time for *M. tessellata* species and uploaded to genBANK.

Horseshoe Adası (Antarktika Yarımadası, Antarktika)'ndan Bazı Likenleşmiş Mantarların DNA Barkodlaması

Anahtar Kelimeler

Antarktika
Biyçeşitlilik
DNA barkodlama
Horseshoe Adası
Likenleşmiş Mantar
mtSSU
nrITS

Öz: Bu çalışmada Antarktika Yarımadası'nın batısında bulunan ve geçici Türk Bilim Üssü'nün bulunduğu Horseshoe Adası'nda yayılış gösteren dört likenleşmiş mantar türünün morfolojik ve anatomik özellikleri aracılığı ile teşhis edilmesi ve *nrITS* veya *mtSSU* gen bölgeleri kullanılarak DNA barkodlamalarının yapılması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda ikinci yazar tarafından Horseshoe Adası'ndan toplanan *Acarospora macrocyclos* Vain., *Mastodia tessellata* (Hook. f. & Harv.) Hook. f. & Harv., *Rhizocarpon grande* (Flörke ex Flot.) Arnold ve *Verrucaria tessellatula* Nyl. species türlerine ait örneklerin DNA barkodlamaları gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında *A. macrocyclos* ve *R. grande* için ilk defa *nrITS* verileri elde edilirken, *M. tessellata* türü için ilk defa *mtSSU* verileri elde edilmiş ve genBANK'a yüklenmiştir.

*İlgili Yazar, email: amervekahramann@gmail.com

1. Introduction

Lichens are the most dominant organisms of Antarctic terrestrial vegetation. Studies on lichens of Antarctica have a history of about two centuries, and especially recently, with the use of DNA-based molecular phylogeny studies, lichen biodiversity determination of the continent has accelerated [1-8]. It is known that the number of lichenized fungi species reported from Antarctica today exceeds 500 [9].

Horseshoe Island is one of the largest islands in Marguerite Bay, west of the Antarctic Peninsula. The island is located at the entrance to Square Bay on the west coast of Graham Lands, occupying it is 12 km long and 6 km

wide. The total area of the island is about 60 km², two-thirds of which is covered by glaciers or semi-annual ice and snow. 29 lichenized fungi species and 15 moss species have been reported from Horseshoe Island. A temporary Science Camp was established on Horseshoe Island during the TAE III expedition in 2019. The preliminary work required to establish a Turkish Scientific Research Base in this region was completed in 2023 and one step further was taken in the process of establishing the base. Because of that determining lichen biodiversity of Horseshoe Island is important.

In this study, it was aimed to DNA barcoding some lichenized fungi samples collected from Horseshoe Island (Antarctic Peninsula, Antarctica) collected by the second author during the VI. National Antarctic Expedition. Collected specimens identified at the species level using morphological characters and these identifications were compared with the species reported in the literature from Horseshoe Island and its surroundings. After DNA isolation from the samples of the studied species, *nrITS* or *mtSSU* gene regions are amplified and then sequence analyses were obtained. The obtained sequence analysis was compared with the sequence datas of other species belonging to the related genus in the GenBank and phylogenetic trees obtained. As a result, in the study, four lichenized fungi species from Horseshoe Island (Antarctic Peninsula, Antarctica) were identified by anatomical, morphological methods and DNA barcodings were made: *Acarospora macrocyclos* Vain., *Mastodia tessellata* (Hook. f. & Harv.) Hook. f. & Harv., *Rhizocarpon grande* (Flörke ex Flot.) Arnold ve *Verrucaria tessellatula* Nyl.

2. Material and Method

2.1. Materials and morphological observation

Lichen samples were collected by the second author during the 6th Turkish Antarctic Expedition. Lichen samples deposited in Erciyes University Lichen Herbarium (ERCH). Stereomicroscope was used for morphological determinations and light microscope was used for anatomical determinations. Macroscopic observations were conducted using an Olympus S2X7 dissecting microscope equipped with an OLYMPUS SC30 image capture system. Handmade sections of ascomata were analyzed using a Leica DM2500 light microscope, and microphotographs were captured with a Flexacam C1 digital camera.

2.2. Isolation, DNA extraction, amplification, and sequencing

For DNA isolation DNeasy Plant Mini Kit (Qiagen) used and isolation carried out according to the manufacturer's instructions. PCR amplifications for the "internal transcribed spacer region (ITS1-5.8S-ITS2 rDNA) gene or Mitochondrial small subunit (*mtSSU*) rDNA gene" were performed with total 50 µl standard reaction volume for each sample. Optimum amplification conditions were obtained with "25 µl 2 × Taq PCR MasterMix in each tube with 19 µl of distilled water, 2 µl of DNA extracts and 2 µl of the primers *ITS1F* and *ITS4* or *mrSSUI*[^] and *mrSSU2*[^]" [10-12]. The thermal cycling conditions included "an initial denaturation step of 95°C for 5min, followed by 35 cycles of 95°C for 45sec (denaturation), 54°C for 45sec (annealing), and 72°C for 60sec (extension) followed by a final extension period of 72°C for 10min". PCR products' sequence analysis made by the EPIGEN laboratories (Ankara, Türkiye). Thin-layer chromatography (TLC) for lichen substances made by following method of Orange et al. [13].

2.3. Phylogenetic analyses

nrITS or *mtSSU* sequence results of fungi samples were edited and aligned using the Clustal W option in the BioEdit V7.2.6.1 [14] program. Phylogenetic analysis of lichenized fungi samples were performed using the Maximum Likelihood (ML) method of the Mega 11 (Molecular Evolutionary Genetic Analysis) software program with a rapid 1000 bootstrap replications [15]. For the ML phylogeny analysis method kimura two-parameter was selected.

3. Results

3.1. *Acarospora macrocyclos* Vain.

Thallus crustose, effigurate, areolate in the center and lobate in the margins, creamish brown, dark brown or almost black, matt or shiny, up to 13 cm diam. Lobes mostly flat, fan shaped or extends paralelly, 1–1.3 mm wide, 2–5 mm high. Prothallus and vegetative propagules absent. Apothecia present, common, aggregated especially on the center of thallus, roundish or slightly angular, semi-immersed to the thallus, reddish brown, dark brown or black, (0.2–)0.3–0.5–0.7(–0.8) mm (n=10) diam. Apothecial margin, prominent, concolorous with thallus, thicker at the young ones. Epihymenium light brown, (20–)50(–75) µm (n=5). Hymenium hyaline, sometimes with brownish tinge, (65–)140(–170) µm (n=5). Hypothecium hyaline, sometimes with brownish tinge or beige coloured, (50–)120(–260) µm (n=5). Ascus poly-spored, more than 100, 130 × 25 µm. Ascospores simple, hyaline, ellipsoid, (3–)3.5(–4.5) µm (n=10). Ascospore l/w ratio: (1.2–)2.25(–1.7) µm (n=10). Paraphyses

simple, unbranched, septate, tips are not enlarged, 2-3 μm . Pycnidium not seen. Algae green, chlorococcoid, algal cells 9.5-12.5 \times 8.5-12 μm (Figure 1).

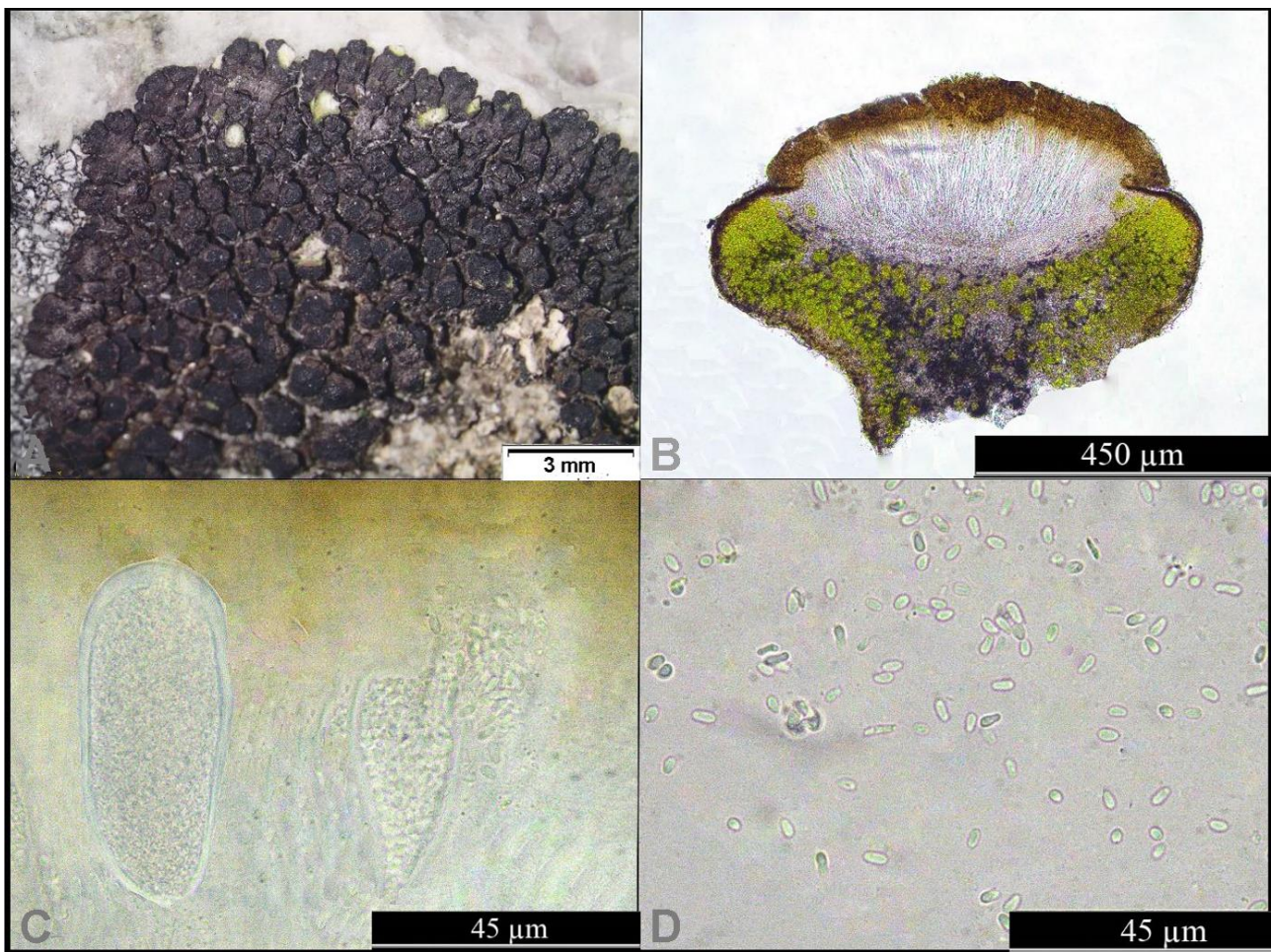


Figure 1. *Acarospora macrocyclos*, A. Habitus, B. Apothecia section, C. Ascus, D. Ascospores.

57 *nrITS* rDNA sequences were used for the phylogenetic analysis of *A. macrocyclos* specimens. Final alignment of the *nrITS* sequence of *A. macrocyclos* in the BLASTn search contained 560 bp after trimming. *Glypholecia scabra* (Pers.) Müll. Arg. is used as outgroup. It is a *Glypholecia* Nyl. genus member which phylogenetically related to *Acarospora* A. Massal genus [16] (Figure 2).

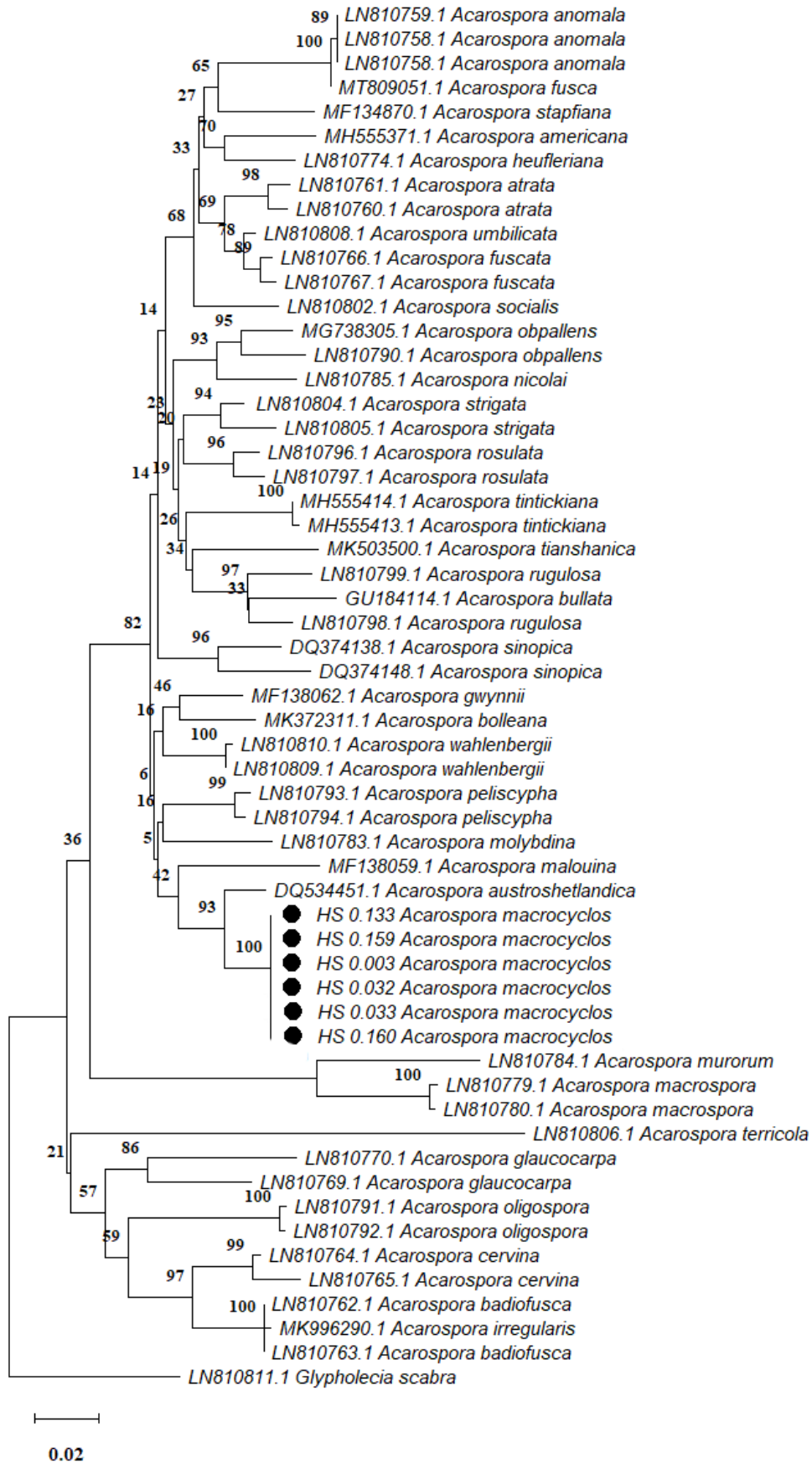


Figure 2. ML phylogeny based on *nrITS* gene region of *Acarospora macrocyclos*.

A. macrocylos is a common species on the rocks in the shore and less common on the morens and rocks at inner places. It is especially very common near the penguin colonies and bird nests [9]. It is an Antarctic endemic species. In Antarctica; it has been reported from South Georgia, Bouvetoya, South Sandwich Islands, South Orkney Islands, South Shetland Islands [9].

Specimen examined: "Antarctica, Antarctic Peninsula, Sally Cove, Horsehoe Island: Bourgeois Fjord, Marguerite Bay, near Y base, 67°48'30"S 67°17'39"W, alt. 10 m, 17 February 2022, on rock, leg. M. G. Halıcı, ERCH HS 0.003, ERCH HS 0.159, ERCH HS 0.160; Lystad Bay, near Temporary Turkish Base, 67°50'09"S 67°14'18"W, alt. 14 m, 11 February 2022, on rock, leg. M. G. Halıcı, ERCH HS 0.032, ERCH HS 0.033; coast of Gaul Bay, 67°49'07"S 67°12'21"W, alt. 10 m, 23 February 2022, on rock, leg. M. G. Halıcı, ERCH HS 0.133."

3.2. *Mastodia tessellata* (Hook. f. & Harv.) Hook. f. & Harv.

Thallus foliose, usually as a form of particles up to 2 cm with brownish black ascending and curved lobes. Lobes 4–8 mm thick and 10–20 mm wide. Perithecia present, usually on the lower surface, sessile. Ascospores simple, hyaline, ellipsoid, 12–13.5 × 3–4 μm, usually without septa, rarely 3-septate. No pycnidium observed (Figure 3).



Figure 3. Thalli of *Mastodia tessellata*.

22 *mtSSU* rDNA sequences was used for the phylogenetic analysis of *M. tessellata* specimen. Final alignment of the *mtSSU* sequence of *M. tessellata* in the BLASTn search contained 800 bp after trimming. *Heteroplacidium imbricatum* (Nyl.) Breuss is used as outgroup belonging to the same family with *M. tessellata* [17] (Figure 4).

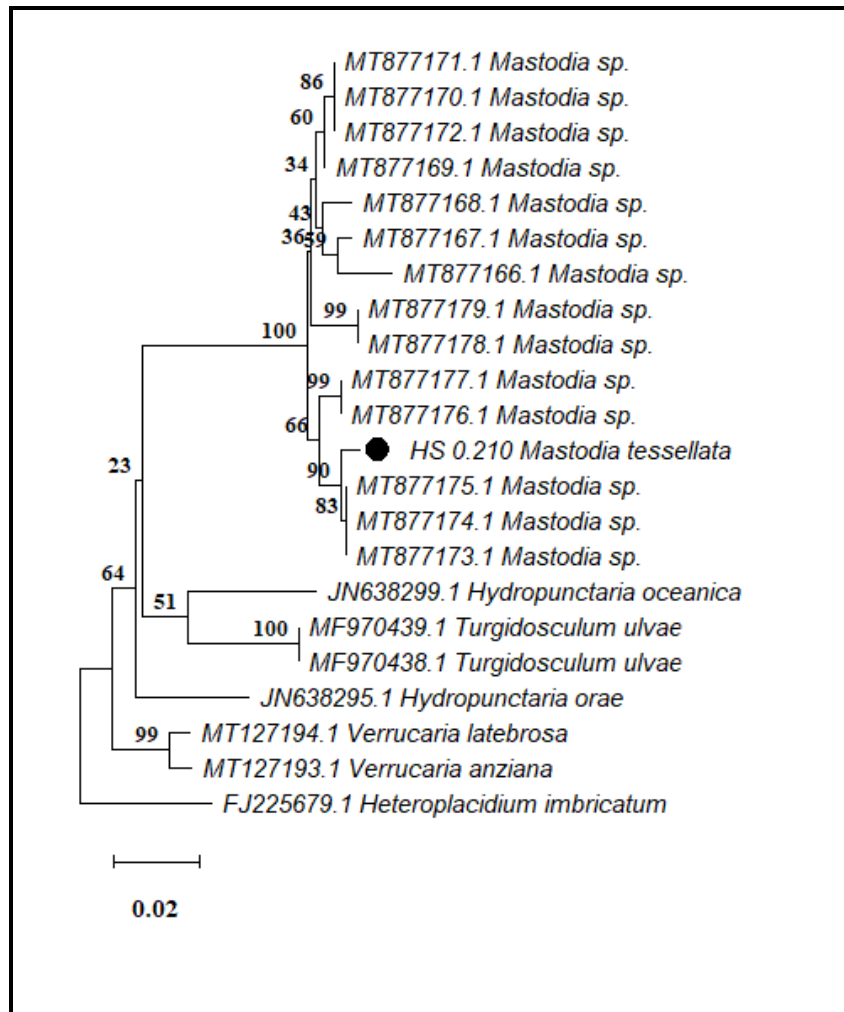


Figure 4. ML phylogeny based on *nrnrITS* gene region of *Mastodia tessellata*.

M. tessellata is usually abundant and widely distributed on rocks close to the shore and occurs on rock surfaces exposed to sea spray and near bird nests. It can also be seen in moist concrete parts of buildings. It has a bipolar distribution. It has a wide distribution especially in Arctic Canada and North America. In Antarctica it has been reported from South Georgia, Marion and Prince Edward Islands, Kerguelen Island, Macquarie Island, South Sandwich Islands, South Orkney Islands, South Sandwich Islands, Antarctic Peninsula and Continental Antarctica [9].

Specimens examined: "Antarctica, Antarctic Peninsula, Sally Cove, Horsehoe Island: Bourgeois Fjord, Marguerite Bay, near Y base, 67°48'30"S 67°17'39"W, alt. 10 m, 17 February 2022, on rock, leg. M. G. Halıcı, ERCH HS 0.210."

3.3. *Rhizocarpon grande* (Flörke ex Flot.) Arnold

Thallus crustose, rimose-areolate, brown or brownish gray. Prothallus present, both around at the thallus and areoles, very thick, black. Apothecia present, immersed between areoles or sessile on areoles, angular or roundish, flat, 0.25–0.7 mm diam. Apothecial disc black. Apothecial margin present, prominent, black. Epithymenium brown, 25–60 μ m. Hymenium hyaline, lower part brownish, 100–135 μ m. Hypothecium brown, 75–140 μ m. Ascus 8-spored. Ascospores brown, muriform (22–)–27–(–41) \times (11–)–15–(–18) μ m (n=20). Paraphyses simple, unbranched, oil droplets present, tips are slightly enlarged, brown pigmented, 2–3 μ m. Algae green, chlorococcoid. Pycnidium not seen. Gyrophoric acid detected by TLC (Figure 5).

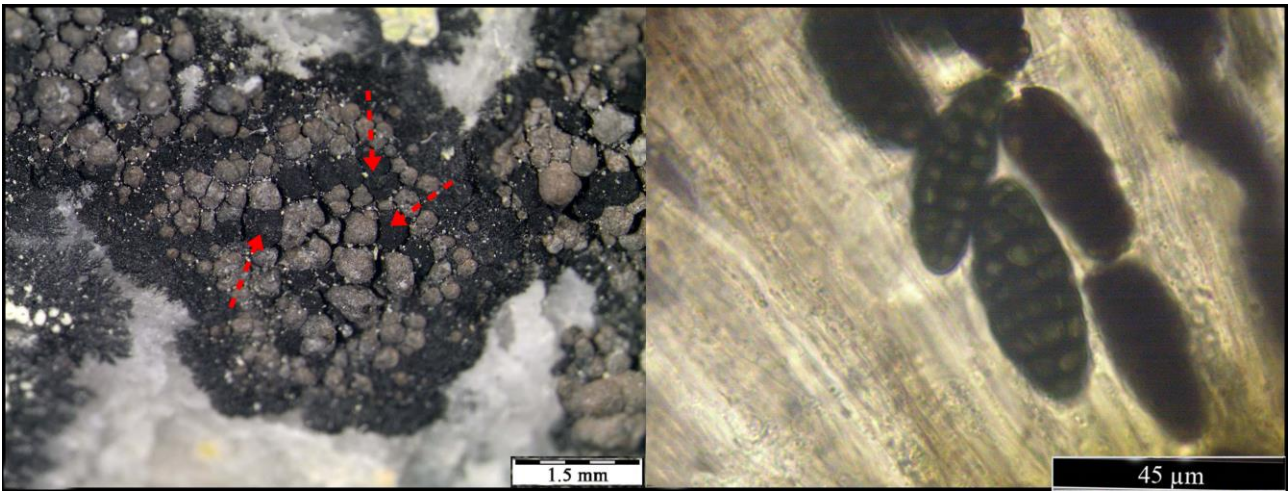


Figure 5. *Rhizocarpon grande*, A. Thallus and apothecia, B. Ascospores.

25 *nrITS* rDNA sequences was used for the phylogenetic analysis of *R. grande* specimen. Final alignment of the *nrITS* sequence of *R. grande* in the BLASTn search contained 550 bp after trimming. *Catolechia wahlenbergii* (Ach.) Flot. is used as outgroup belonging to the same family with *R. grande* [18] (Figure 6).

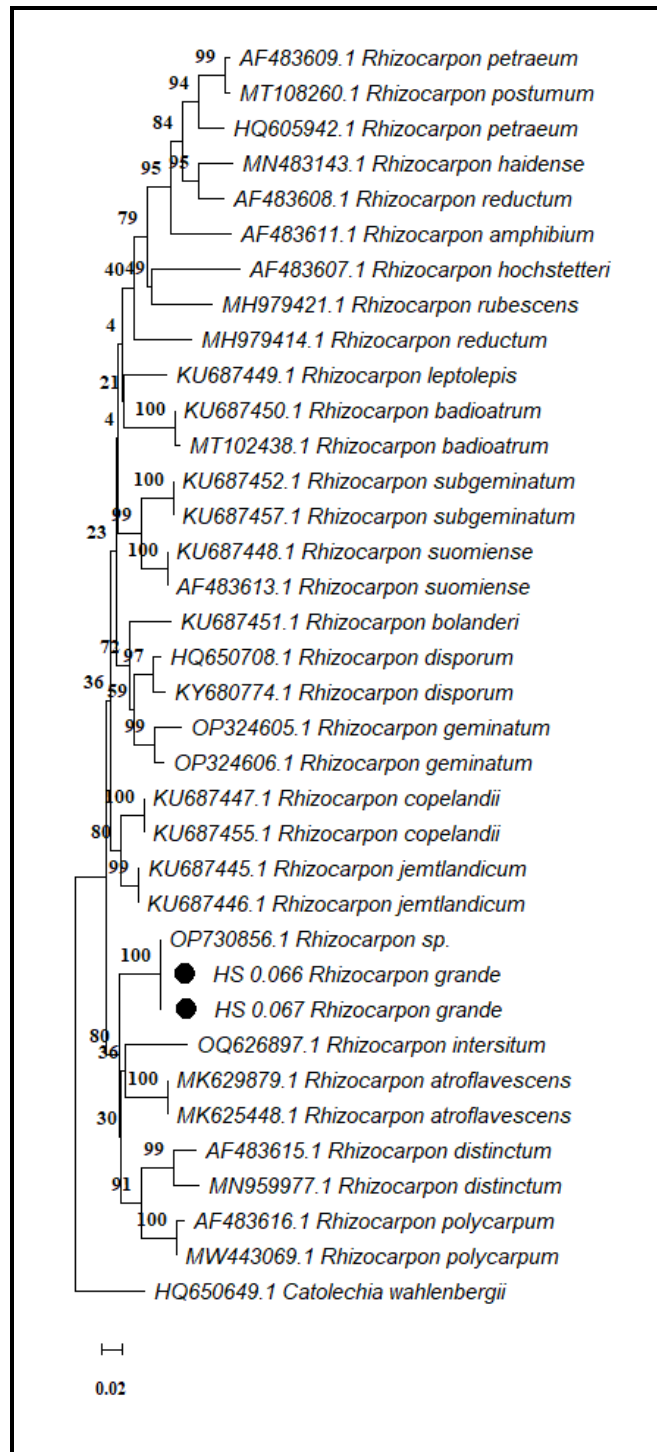


Figure 6. ML phylogeny based on *nrITS* gene region of *Rhizocarpon grande*.

R. grande occurs on rocks and stones. It has a bipolar distribution. It has been known from North Europe, North America and Antarctica. Recently it has been reported from South Korea and China too. In Antarctica, it has been reported from South Orkney Islands, South Shetland Islands and Antarctic Peninsula [9].

Specimens examined: Antarctica, Antarctic Peninsula, Horseshoe Island, coast of Gaul Bay, 67°49'07"S 67°12'21"W, alt. 10 m, 23 February 2022, on rock, leg. M. G. Halıcı, ERCH HS 0.066; Southeast of Sally Cove, 67°48'58"S 67°18'9"W, alt. 65 m, 17 February 2022, on rock, leg. M. G. Halıcı, ERCH HS 0.067."

3.4. *Verrucaria tessulatula* Nyl.

Thallus effuse, matt greenish brown, rimose, medium thick, up to 3 cm diam. Cracks irregular, whitened, divides thallus into small pieces. Perithecia immersed or semi-immersed, black 0.1–0.25 mm diam. Involucrum only at upper parts, blackish brown, edges of the involucrum are hyaline. Ascus 8-spored. Ascospores ellipsoid, hyaline, oil droplets present, 9–12 × 5–7 μm. Pycnidia not seen (Figure 7).

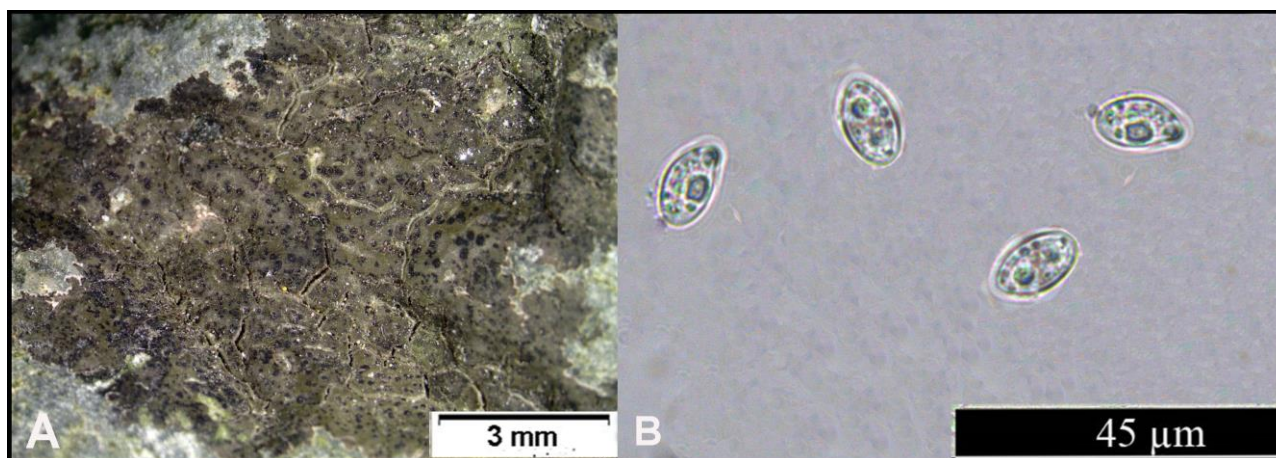


Figure 7. *Verrucaria tessulatula*, A. Thallus, B. Ascospores.

42 *nrITS* DNA sequences was used for the phylogenetic analysis of *V. tessulatula* specimen. Final alignment of the *nrITS* sequence of *V. tessulatula* in the BLASTn search contained 665 bp after trimming. *Heteroplacidium imbricatum* (Nyl.) Breuss is used as outgroup belonging to the same family with *V. tessulatula* [17] (Figure 8).

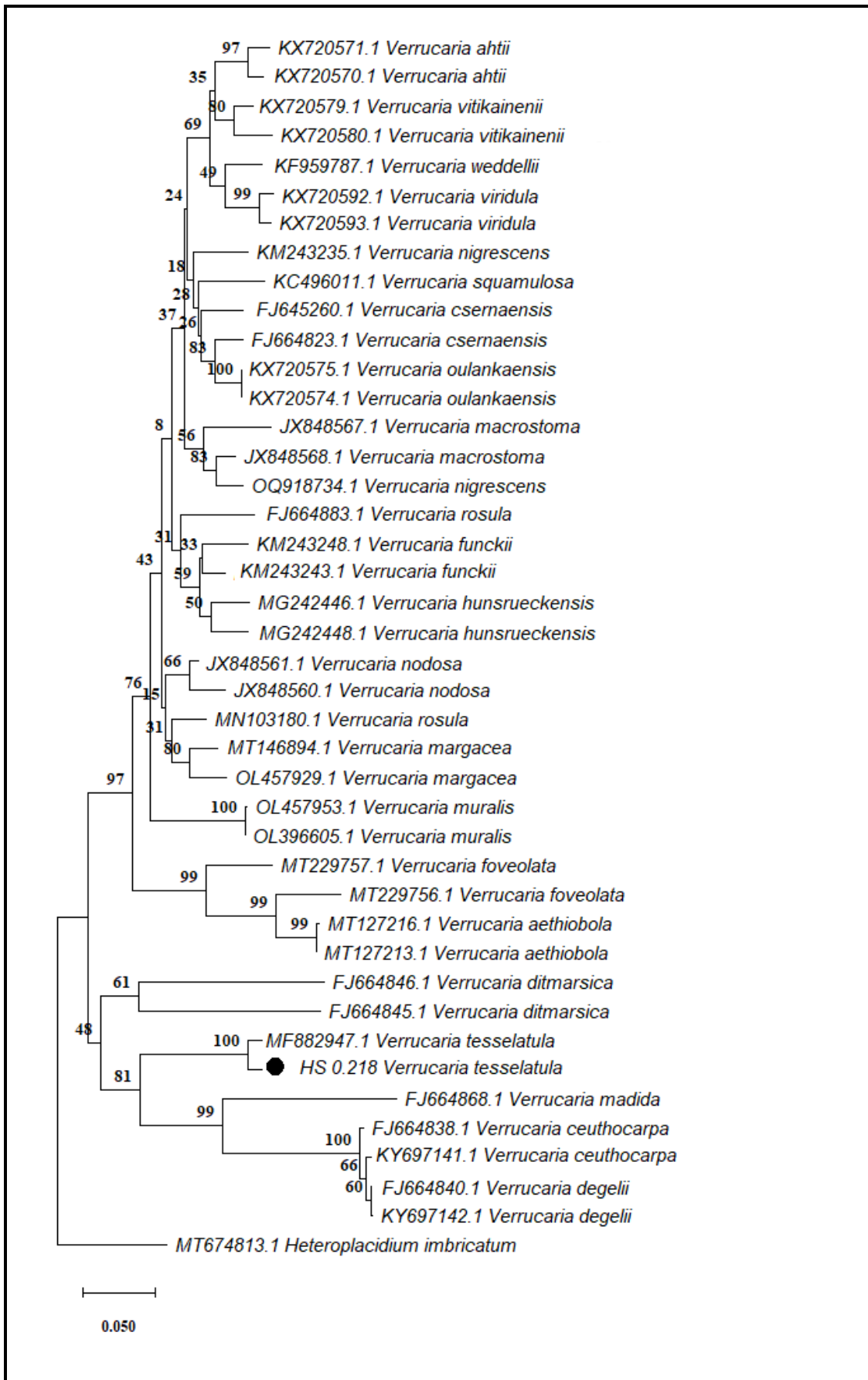


Figure 8. ML phylogeny based on *nrITS* gene region of *Verrucaria tesselatula*.

V. tessellatula occurs on rocks close to the shore and exposed to sea spray. It is Antarctic endemic species. In Antarctica it has been reported from South Georgia, Marion and Prince Edward Island, Kerguelen Island, Bouvetoya, South Orkeny Islands, South Shetland Islands [9].

Specimen examined: "Antarctica, Antarctic Peninsula, Horseshoe Island, Lystad Bay, North of the Temporary Turkish Base, 67°49'49"S 67°14'03"W, alt. 14 m, 16 February 2022, on rock, leg. M. G. Halıcı, ERCH HS 0.218."

4. Discussion and Conclusion

In this study, we performed DNA barcoding of some previously known and reported species from Horseshoe Island. For this purpose, we studied *Acarospora macrocyclos* Vain., *Mastodia tessellata* (Hook. f. & Harv.) Hook. f. & Harv., *Rhizocarpon grande* (Flörke ex Flot.) Arnold and *Verrucaria tessellatula* Nyl. species based on *nrITS* or *mtSSU* phylogeny.

A. macrocyclos is a species characterized by its large, effigurate, dark brown thallus and semi-immersed apothecia in the areoles. According to ITS phylogeny (Figure 2) six specimen of *A. macrocyclos* (ERCH HS 0.003, ERCH HS 0.032, ERCH HS 0.033, ERCH HS 0.133, ERCH HS 0.159 and ERCH HS 0.160) matches with each other with a high BS support (BS>95). In GenBANK, there is no molecular data of *A. macrocyclos* [19]. Within this study, *nrITS* gene data of *A. macrocyclos* obtained and uploaded to GenBANK for the first time in the literature. In Figure 2, six specimens belong to *A. macrocyclos* is in the same clade with *A. austroshetlandica* (C.W. Dodge) Øvstedal. *A. macrocyclos* and *A. austroshetlandica* is also similar morphologically and anatomically. The two species are distinguished from each other whether the lobes are convex or flat and the length of the ascospores. *A. macrocyclos* has flat lobes and ascospores are mostly 4 µm, but *A. austroshetlandica* has convex lobes and ascospores are mostly up to 3 µm [9]. There is only one record in GenBANK for *A. austroshetlandica* species, and the specimens we collected from Horseshoe Island are separated from this record. according to *nrITS* gene phylogeny. Although the morphological difference between these two species is very controversial, we think that the samples we collected from the study area belong to the *A. macrocyclos* species and molecular data confirms this finding.

M. tessellata is the type species of the *Mastodia* genus and is known to be the only lichenized fungus species that establishes a symbiotic relationship with macro green algae of *Prasiola* genus [20]. In the literature, this species was also called a lichen-like organism in the past and with studies conducted over the years, it was decided that it is a lichenized fungus. And also it was decided that *M. tessellata* is synonymous with *Mastodia mawsonii* Dodge, another species described by Dodge from Antarctica [9, 21]. Studies based on the *nrITS* gene region were carried out on *M. tessellata* specimen (ERCH HS 0.210), but despite long efforts *nrITS* gene data could not be obtained. According to *mtSSU* phylogeny (Figure 4) HS 0.210 matches with *Mastodia* sp. datas in GenBANK. There is no data on the *mtSSU* gene region of the *M. tessellata* species in GenBANK. The datas matching our specimen uploaded to GenBANK as *Mastodia* sp. is probably are *M. tessellata*. With this study, the first *mtSSU* data of *M. tessellata* species has been obtained and uploaded to GenBANK.

R. grande is a species characterized by containing gyrophoric acid, barbatic acid, norstictic acids, stictic acid and not containing rhizocarpic acid as secondary metabolite. According to ITS phylogeny (Figure 6), two specimens (ERCH HS 0.066 and ERCH HS 0.067) matches with each other and separated from other known *Rhizocarpon* species. In GenBANK there is not data of *R. grande*. Within this study, ITS gene data of *R. grande* obtained for the first time and uploaded to GenBANK. These two specimens also match with *Rhizocarpon* sp. data in GenBANK. This data is uploaded to GenBANK by La Torre et al. [22]. Their specimen has a gray or light green thallus on a notorious black prothallus, areoles scattered on the substrate, and lecideine and sessile apothecia. The gray, submuriform ascospores were 28–32 µm long, with up to four transverse and one longitudinal septa. They said their specimen similar to *R. grande* species but comparison of characteristics to confirm the identity of the sample uploaded to GenBANK was not possible. But we believe, it is probably *R. grande* too. According to ITS phylogeny *R. grande* is closely related to *Rhizocarpon intersitum* Arnold species. Both species is also similar by their large ascospores. Both species contain gyrophoric acid. However, *R. grande* generally differs from *R. intersitum* by its I+ blue medulla, K+ red epihymenium, and larger ascospores compared to *R. intersitum*. Additionally, *R. intersitum* contains atranorin in addition to gyrophoric acid [23]. Anatomically and morphologically *R. grande* is similar to *R. distinctum* Th. Fr. and *R. obscuratum* (Ach.) A. Massal species, which are distributed in Antarctica too and have 8-spored ascus like *R. grande*. However, the ascospores in *Rhizocarpon grande* are considerably larger than the other two species (9).

V. tessellatula is an Antarctic endemic species. According to ITS phylogeny (Figure 8) HS 0.218 matches with *V. tessellatula* data in GenBANK. Phylogenetically *V. tessellatula* closely related to *Verrucaria madida* Orange. *V. madida* is the only species which has 4-spored asci in *Verrucaria* genus. So it can be easily distinguished from other *Verrucaria* genus members. Also *V. tessellatula* is similar to *Verrucaria ceuthocarpa* Wahlenb. ex Ach. and

Verrucaria psychrophila I. M. Lamb. In all three species, involucrem is only at upper part and there are cracks on the thallus. While these cracks are black or white in *V. tessellatula*, they are concolorous with thallus in *V. ceuthocarpa* and *V. psychrophila* [9].

Acknowledgment

The second author thanks Erciyes University for their financial support to conduct the field work on Horseshoe Island, Antarctica, and TÜBİTAK MAMKARE for their support. This work was financially supported by “The Scientific and Technological Research Council of Turkey-TÜBİTAK (Project Number 121Z771)” and “TÜBA (Turkish Academy of Sciences)”.

References

- [1] Halıcı, M. G., Güllü, M., Barták, M. 2017. First record of a common endolithic lichenized fungus species *Catenarina desolata* Søchting, Søgaard Elvebakk. from James Ross Island (Antarctic Peninsula). Czech Polar Reports, 7(1), 11-17.
- [2] Halıcı, M. G., Barták, M., Güllü, M. 2018. Identification of some lichenised fungi from James Ross Island (Antarctic Peninsula) using *nrITS* markers. New Zealand Journal of Botany, 56(3), 276-290.
- [3] Halıcı, M. G., Osmanoğlu, O. M., Kahraman, M. 2020. A new record of lichenized fungus species for Antarctica: *Peltigera castanea* Goward, Goffinet Mıçl. Czech Polar Reports Journal, 10(1), 50-58.
- [4] Halıcı, M. G., Möller, E., Timdal, E., Kahraman Yiğit, M., & Bölükbaşı, E. 2022. *Rhizocarpon ozsoyae* sp. nova (Rhizocarpaceae, lichenized Ascomycetes) from James Ross Island (Antarctic Peninsula). Herzogia, 35(1), 105-114.
- [5] Halıcı, M. G., Güllü, M., Bölükbaşı, E., & Kahraman Yiğit, M. 2023. *Thamnolecania yunusii* (Ramalinaceae)–A new species of lichenised fungus from Horseshoe Island (Antarctic Peninsula). Polar Record, 59, e37.
- [6] Kahraman Yiğit, M., & Halıcı, M. G. 2021. *Buellia epigaea* (Pers.) Tuck, a new record of lichenized fungus species for Antarctica. Czech Polar Reports, 11(1), 9-15.
- [7] Kitaura, M. J., Scur, M. C., Spielmann, A. A., & Lorenz-Lemke, A. P. 2018. A revision of *Leptogium* (Collembataceae, lichenized Ascomycota) from Antarctica with a key to species. Lichenologist, 50, 467–485.
- [8] Park, C. H., Hong, S. G., & Elvebakk, A. 2018. *Psoroma antarcticum*, a new lichen species from Antarctica and neighbouring areas. Polar Biology, 41, 1083-1090.
- [9] Øvstedal, D. O., Lewis-Smith, R. I. 2001. Lichens of Antarctica and South Georgia. A Guide to Their Identification and Ecology. Cambridge: Cambridge University Press, 411p.
- [10] Gardes, M., & Bruns, T. D. 1993. ITS primers with enhanced specificity for basidiomycetes-application to the identification of mycorrhizae and rusts. Molecular Ecology, 2(2), 113-118.
- [11] White, T. J., Bruns, T., Lee, S., Taylor, J. 1990. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. In: Innis MA, Gelfand DH, Sninsky JJ, White TJ (eds) PCR Protocols: a Guide to Methods and Applications, pp. 315-322. Academic Press, New York.
- [12] Zoller, S., Scheidegger, C., & Sperisen, C. 1999. PCR primers for the amplification of mitochondrial small subunit ribosomal DNA of lichen-forming ascomycetes. The Lichenologist, 31(5), 511-516.
- [13] Orange A., James P. W., White F. J. 2001. Micro-chemical Methods for the Identification of Lichens. British Lichen Society, London, 101p.
- [14] Hall, T. A. 1999. BioEdit: a user-friendly biological sequence alignment editor and analysis program for Windows 95/98/NT. Nucleic Acids Symposium Series, 41(41), 95-98.
- [15] Tamura, K., Stecher, G., & Kumar, S. 2021. MEGA11: molecular evolutionary genetics analysis version 11. Molecular Biology and Evolution, 38(7), 3022-3027.

- [16] Yin, A. C., Zhong, Q. Y., Scheidegger, C., Jin, J. Z., Worthy, F. R., Wang, L. S., & Wang, X. Y. 2023. The phylogeny and taxonomy of *Glypholecia* (Acarosporaceae, lichenized Ascomycota), including a new species from northwestern China. *Mycologia*, 98, 153-165.
- [17] Prieto, M., Martínez, I., Aragón, G., Gueidan, C., Lutzoni, F. (2011). Molecular phylogeny of *Heteropladium*, *Placidium*, and related catapyrenioid genera (Verrucariaceae, lichen-forming Ascomycota). *American Journal of Botany*, 99(1), 23-35.
- [18] Davydov, E. A., & Yakovchenko, L. S. 2017. *Rhizocarpon smaragdulum*, a new monosporic yellow-thalline species and some additional species of the genus *Rhizocarpon* from the Altai Mountains (Siberia). *The Lichenologist*, 49(5), 457-466.
- [19] NCBI GenBank Database: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/genbank/>. Access date: March, 2023.
- [20] Garrido-Benavent, I., de los Ríos, A., Fernández-Mendoza, F., & Pérez-Ortega, S. 2018. No need for stepping stones: direct, joint dispersal of the lichen-forming fungus *Mastodia tessellata* (Ascomycota) and its photobiont explains their bipolar distribution. *Journal of Biogeography*, 45(1), 213-224.
- [21] Castello, M., & Nimis, P. L. 1995. The lichen vegetation of Terra Nova Bay (Victoria Land, continental Antarctica). *Bibliotheca Lichenologica*, 58, 43-55.
- [22] La Torre, R. D., Ramos, D., Mejía, M. D., Neyra, E., Loarte, E., & Orjeda, G. 2023. Survey of Lichenized Fungi DNA Barcodes on King George Island (Antarctica): An Aid to Species Discovery. *Journal of Fungi*, 9(5), 552.
- [23] McCarthy, P., Elix, J. 2014. The lichen genus *Rhizocarpon* in mainland Australia. *Telopea*, 16, 195-211.

Appendices

Appendix A. Genbank numbers of used sequences in phylogenetic trees within this study. **Newly generated data within this study given in bold.**

Species	<i>nrITS</i>	<i>mtSSU</i>	Locality
ERCH HS 0.003 <i>Acarospora macrocyclos</i>	OR687574		Horseshoe Island, Antarctica
ERH HS 0.032 <i>Acarospora macrocyclos</i>	OR687575		Horseshoe Island, Antarctica
ERH HS 0.033 <i>Acarospora macrocyclos</i>	OR687576		Horseshoe Island, Antarctica
ERH HS 0.133 <i>Acarospora macrocyclos</i>	OR687579		Horseshoe Island, Antarctica
ERH HS 0.159 <i>Acarospora macrocyclos</i>	OR687577		Horseshoe Island, Antarctica
ERH HS 0.160 <i>Acarospora macrocyclos</i>	OR687578		Horseshoe Island, Antarctica
ERCH HS 0.210 <i>Mastodia tessellata</i>		PP397045	Horseshoe Island, Antarctica
ERCH HS 0.066 <i>Rhizocarpon grande</i>	OR687590		Horseshoe Island, Antarctica
ERCH HS 0.067 <i>Rhizocarpon grande</i>	OR687591		Horseshoe Island, Antarctica
ERCH HS 0.218 <i>Verrucaria tessellatula</i>	OR728797		Horseshoe Island, Antarctica
<i>Acarospora anomala</i>	LN810758		Sweden
	LN810759		Sweden
<i>Acarospora atrata</i>	LN810760		Seden
	LN810761		Norway
<i>Acarospora badiofusca</i>	LN810762		Sweden
	LN810763		Sweden
<i>Acarospora bullata</i>	GU184114		Italy
<i>Acarospora americana</i>	MH555371		U.S.A
<i>Acarospora austroshetlandica</i>	DQ534451		King George Island, Antarctica
<i>Acarospora bolleana</i>	MK372311		U.S.A
<i>Acarospora cervina</i>	LN810764		Switzerland
<i>Acarospora cervina</i>	LN810765		Sweden
<i>Acarospora fusca</i>	MT809051		Germany
<i>Acarospora fuscata</i>	LN810766		Sweden
	LN810767		Sweden
<i>Acarospora glaucarpa</i>	LN810769		Sweden
	LN810770		Sweden
<i>Acarospora gwynii</i>	MF138062		China
<i>Acarospora heufleriana</i>	LN810774		Switzerland
<i>Acarospora irregularis</i>	MK996290		Türkiye
<i>Acarospora macrospora</i>	LN810779		Norway
	LN810780		Sweden
<i>Acarospora malouina</i>	MF138059		China
<i>Acarospora molybdina</i>	LN810783		Sweden
<i>Acarospora murorum</i>	LN810784		Spain
<i>Acarospora nicolai</i>	LN810785		U. S. A
<i>Acarospora obpallens</i>	LN810790		U. S. A
	MG738305		Falkland Islands
<i>Acarospora oligospora</i>	LN810791		Norway
	LN810792		Sweden
<i>Acarospora peliscypha</i>	LN810793		Sweden
	LN810794		Norway
<i>Acarospora rosulata</i>	LN810796		U.S.A
	LN810797		Norway
<i>Acarospora rugulosa</i>	LN810798		Norway
	LN810799		Sweden
<i>Acarospora sinopica</i>	DQ374138		Sweden
	DQ374148		Sweden
<i>Acarospora socialis</i>	LN810802		U.S.A
<i>Acarospora stapfiana</i>	MF134870		China
<i>Acarospora strigata</i>	LN810804		U.S.A
	LN810805		U.S.A
<i>Acarospora terricola</i>	LN810806		Sweden
<i>Acarospora tianshanica</i>	MK503500		U.S.A
<i>Acarospora tintickiana</i>	MH555413		U.S.A
	MH555414		U.S.A

<i>Acarospora umbilicata</i>	LN810808		Sweden
<i>Acarospora wahlenbergii</i>	LN810809		Sweden
	LN810810		Sweden
<i>Catolechia wahlenbergii</i>	HQ650649		-
<i>Glypholecia scabra</i>	LN810811		Norway
<i>Heteroplacidium imbricatum</i>	MT674813	FJ225679	-
<i>Hydropunctaria oceanica</i>		JN638299	United Kingdom
<i>Hydropunctaria orae</i>		JN638298	Faroe Islands
<i>Mastodia</i> sp. 1129		MT877166	Chile
<i>Mastodia</i> sp. 1930		MT877167	Kerguelen Islands, France
<i>Mastodia</i> sp. 1880		MT877168	Kerguelen Islands, France
<i>Mastodia</i> sp. 1902		MT877169	Kerguelen Islands, France
<i>Mastodia</i> sp. 1910		MT877170	Australia
<i>Mastodia</i> sp. 1911		MT877171	Australia
<i>Mastodia</i> sp. 1959		MT877172	Livingston Island, Antarctica
<i>Mastodia</i> sp. 1973		MT877173	Rothera Point, Antarctica
<i>Mastodia</i> sp. 1884		MT877174	Bounty Islands, New Zealand
<i>Mastodia</i> sp. 1927		MT877175	King George Island, Antarctica
<i>Mastodia</i> sp. 1937		MT877176	Kerguelen Islands, France
<i>Mastodia</i> sp. 1891		MT877177	Antipodes Island, New Zealand
<i>Mastodia</i> sp. 1866		MT877178	Princess Island, New Zealand
<i>Mastodia</i> sp. 1867		MT877179	Princess Island, New Zealand
<i>Rhizocarpon amphibium</i>	AF483611		Norway
<i>Rhizocarpon atroflavescens</i>	MK625448		China
	MK629879		China
<i>Rhizocarpon badioatrum</i>	KU687450		Norway
	MT102438		China
<i>Rhizocarpon bolanderi</i>	KU687451		Norway
<i>Rhizocarpon copelandii</i>	KU687447		Norway
<i>Rhizocarpon copelandii</i>	KU687455		Norway
<i>Rhizocarpon disporum</i>	HQ650708		U.S.A
	KY680774		Russia
<i>Rhizocarpon distinctum</i>	AF483615		Norway
	MN959977		-
<i>Rhizocarpon geminatum</i>	OP324605		James Ross Island, Antarctica
	OP324606		James Ross Island, Antarctica
<i>Rhizocarpon haidense</i>	MN483143		U.S.A
<i>Rhizocarpon hochstetteri</i>	AF483607		Norway
<i>Rhizocarpon intersitum</i>	OQ626897		China
<i>Rhizocarpon jemtlandicum</i>	KU687445		Norway
	KU687446		Norway
<i>Rhizocarpon leptolepis</i>	KU687449		Finland
<i>Rhizocarpon petraeum</i>	AF483609		Norway
	HQ605942		Türkiye
<i>Rhizocarpon polycarpum</i>	AF483616		Norway
	MW443069		China
<i>Rhizocarpon postumum</i>	MT108260		China
<i>Rhizocarpon reductum</i>	AF483608		Norway
	MH979414		-
<i>Rhizocarpon rubescens</i>	MH979421		-
<i>Rhizocarpon</i> sp.	OP730856		King George Island, Antarctica
<i>Rhizocarpon subgeminatum</i>	KU687452		Norway
	KU687457		Norway
<i>Rhizocarpon suomiense</i>	AF483613		Norway
	KU687448		Norway
<i>Turgidosculum ulvae</i>		MF970438	U.S.A
		MF970439	U.S.A
<i>Verrucaria aethiobola</i>	MT127213		Finnmark
	MT127216		Norway
<i>Verrucaria ahtii</i>	KX720570		Finland
	KX720571		Finland

<i>Verrucaria anziana</i>		MT127193	United Kingdom
<i>Verrucaria ceuthocarpa</i>	FJ664838		Iceland
	KY697141		Iceland
<i>Verrucaria csernaensis</i>	FJ645260		United Kingdom
<i>Verrucaria csernaensis</i>	FJ664823		United Kingdom
<i>Verrucaria degelii</i>	FJ664840		Iceland
	KY697142		Iceland
<i>Verrucaria ditmarsica</i>	FJ664845		United Kingdom
	FJ664846		United Kingdom
<i>Verrucaria foveolata</i>	MT229757		Finland
<i>Verrucaria funckii</i>	KM243243		Germany
	KM243248		Austria
<i>Verrucaria hunsrueckensis</i>	MG242446		Germany
	MG242448		Germany
<i>Verrucaria latebrosa</i>		MT127194	United Kingdom
<i>Verrucaria macrostoma</i>	JX848567		United Kingdom
<i>Verrucaria madida</i>	FJ664868		United Kingdom
<i>Verrucaria margacea</i>	MT146894		Germany
	OL457929		Czech Republic
<i>Verrucaria muralis</i>	OL396605		Czech Republic
	OL457953		Czech Republic
<i>Verrucaria nigrescens</i>	JX848568		United Kingdom
	KM243235		Germany
<i>Verrucaria nodosa</i>	JX848560		United Kingdom
	JX848561		United Kingdom
<i>Verrucaria oulankaensis</i>	KX720574		Finland
	KX720575		Finland
<i>Verrucaria rosula</i>	FJ664883		United Kingdom
	MN103180		China
<i>Verrucaria squamulosa</i>	KC496011		Italy
<i>Verrucaria tessellata</i>	MF882947		Chile
<i>Verrucaria viridula</i>	KX720592		Finland
	KX720593		Finland
<i>Verrucaria vitikainenii</i>	KX720579		Finland
	KX720580		Finland
<i>Verrucaria weddelii</i>	KF959787		France

Savunma Sektöründeki Sistemlerin Arızalar Arası Ortalama Süre Analizi

G.Karaköse¹, M.Çağlar¹, H.Demir¹, H.Kuzğun Aksoy, A.Aydin¹, U.Arıcan*¹,
F.Y.Kalender Öksüz²

*¹ Defense Industry, Integrated Logistic Support Directorate, ASELSAN Inc., ANKARA

²Gazi University, Industrial Engineering, ANKARA

(Alınış / Received: 26.04.2024, Kabul / Accepted: 22.07.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.08.2024)

Anahtar Kelimeler

Güvenilirlik
AAOS Analizi,
Güvenilirlik Analizi,
Entegre Lojistik Destek.

Öz: Yüksek teknoloji çalışmaları için Güvenilirlik Analizi, tasarım aşamasında MIL-HDBK-217F ve Telcordia SR-332 veya kullanım aşamasında saha verileriyle Weibull Dağılımı gibi birçok farklı metodolojiye göre yapılmaktadır. Bu makalenin amacı, daha doğru Arızalar Arası Ortalama Süre (AAOS) değerleri için bir metodoloji elde etmek amacıyla AAOS hesaplama yöntemlerini karşılaştırmaktır. Bu makalede; Savunma Sanayiinde kullanılan sistemler için MIL-HDBK-217F standardı ve Weibull Dağılımı baz alınarak hesaplanan AAOS değerleri karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonuç kısmında; sonuçlar incelenmiş olup daha güvenilir AAOS değerleri için MIL-HDBK-217F standardını daha iyi hale getirecek bir düzeltme katsayısının bulunabileceği önerilmektedir.

MTBF Analysis of Systems in Defense Industry

Keywords

Reliability,
MTBF Analysis,
Reliability Analysis,
Integrated Logistics Support.

Abstract: For high technology working environment Reliability Analysis is implemented according to various methodologies such as MIL-HDBK-217F and Telcordia SR-332 in design phase or Weibull Distribution with field data in usage phase. This paper aims to compare Mean Time Between Failure (MTBF) calculation methods in order to establish a more accurate methodology for MTBF values. In this article; MTBF values calculated based on MIL-HDBK-217F standard and Weibull Distribution are compared for the systems used Defense Industry. In the conclusion of the article; the results are examined and as a result, it is recommended that a correction coefficient could enhance the accuracy of MTBF values derived from the MIL-HDBK-217F standard.

*İlgili Yazar, email: cuarican@aselsan.com.tr

1. Introduction

Integrated Logistics Support (ILS) represents a methodology that emerged with the aim of providing supportability features throughout the design and development processes of a system or product. The concept of ILS encompasses support at all maintenance and repair levels of systems. The processes within the Integrated Logistics Support methodology are fundamentally defined as 12 Integrated Logistics Support Elements. These ILS Elements are Maintenance Plan, Manpower and Personnel, Supply Support, Support Equipment, Technical Data, Training and Training Support, Computer Resource Support, Facilities, Packaging, Handling, Storage, and Transportation (PHST), Design Interface, Continuous Engineering, and Product Support Management.

This article focuses on the Design Interface concept within these ILS Elements. The Design Interface element covers how long a system will be in use before a failure, how much time it will take to repair in case of a failure, and the development of maintainability methodologies. For instance, after designing the system, the design engineer shares design documents to the ILS engineer for conducting the Mean Time Between Failures (MTBF) analysis. The ILS engineer performs the analysis considering factors such as the operating temperature and environmental conditions of the system in order to compare with the user's requirements. If the analysis indicates that the obtained value does not meet the user's requirements, the ILS engineer gives feedback the designer about

this issue and requests a revision in the design. The designer may improve the design by switching higher quality level components or inserting redundancy blocks to the design. The Design Interface is implemented effectively by this process.

Reliability, Availability, and Maintainability Analysis (RAM) based on Military Standards (namely MIL-HDBK-338B Electronic Reliability Design Handbook and MIL-HDBK-217F Reliability Prediction of Electronic Equipment) are commonly conducted in order to ensure the impact of ILS elements on design. RAM analysis is comprehensive, bottom-up (part-component-device-system) analysis that rely heavily on statistical methods and are based on failure and maintenance data. MIL-HDBK-338B Electronic Reliability Design Handbook is written for reliability engineers and provides guidance. According to MIL-HDBK-338B, Reliability has two definitions: Firstly, Reliability is the duration or probability of failure-free performance under stated conditions. Reliability also can be defined as the probability that an item can perform its intended function for a specified interval under stated conditions. In addition, availability is a measure of the degree to which an item is in an operable and committable state at the start of a mission when the mission is called for at an unknown time. Lastly, maintainability is the relative ease and economy of time and resources with which an item can be retained in, or restored to, a specified condition when maintenance is performed by personnel having specified skill levels, using prescribed procedures and resources, at each prescribed level of maintenance and repair.

This article specifically has a focus on Reliability Analysis, and Mean Time Between Failures (MTBF) which is the fundamental parameter in Reliability Analysis. According to MIL-HDBK-338B, MTBF is a basic measure of reliability for repairable items. The mean number of life units during which all parts of the item perform within their specified limits, during a particular measurement interval under stated conditions. Reliability Analysis is done based on the data gathering from design phase and usage phase in field. The results of Reliability Analysis are used for spare parts planning, maintenance cost and many Integrated Logistic Support issues.

In the first section, the calculation methods for MTBF are explained according to MIL-HDBK-217F which is one of the military standards giving information on reliability prediction procedures and Weibull Methodology.

The flow of the work in the rest of the paper is as follows. In the second section, the MTBF values for two defense industry systems are calculated using the Weibull and MIL-HDBK-217F methodologies. The subsequent section presents the results obtained from these calculations. Mean Time Between Failure (MTBF) values are obtained according to MIL-HDBK-217F standard and Weibull Distribution for comparison. The final section provides recommendations based on the results obtained.

2. Material and Method

2.1. Literature Review

For literature review, articles covering studies, analyses, and methodologies on Reliability Analyses focusing on Mean Time Between Failure from 1995 to the present have been examined. The content of these articles explores studies conducted in various sectors.

M. Kimura et al. (1995) predicted the reliability of a software system during arbitrary testing periods. The paper introduced a method of software reliability prediction that leverages software failure-occurrence time data and employs software reliability growth models represented by a nonhomogeneous Poisson process (NHPP) [1].

Wang H. and Pham H. (1996) addressed the challenges associated with evaluating the Mean Time Between Failures, availability and reliability for complex large-scale systems. The paper explored the combination of Monte Carlo technique and Bayes method [2].

Angus J. E. (1988) presented a method for finding out a methodology for Mean Time Between Failure in k-out-of-n: G parallel system with unlimited repair (There are enough repairmen to repair simultaneously any number of failed units) and exponential failure and repair times of the failed unit [3].

Crocker J. et al. (1998) suggested a new alternative measure, called Maintenance Free Operating Period, to MTBF and Failure Rate since MTBF has main disadvantage; namely being impossible to predict MTBF if failure rate distribution is not exponential [4].

Elerath J. G. (2000) recommended to analyze hazard rate with using Weibull distribution instead of analyzing MTBF using with exponential distribution for disk drive industry [5].

Jia Y. et al. (2002) presented approach to analyze the time between failures for machining centers (MC). By applying likelihood function, the authors fit the Weibull distribution to model the TBF of MCs. Additionally, the study is conducted Goodness-of-fit tests employing Hollander's method, providing that the time between MC failures adheres to the Weibull distribution [6].

Mondro M. J. (2002) described a simple technique for estimating a mean time between operational failure (MTBF) that was measured at periodic intervals. This type of maintenance was appropriate in high perceptions, after the missionaries' assignments are over. This approach could greatly simplify MTBF analysis for large systems. This article provided the equations and limited the possible errors in this estimate [7].

Carlson J. et al. (2004) investigated the reliability of mobile robots used in hazardous environments, revealing a MTBF of 24 hours and availability of 54%, with the control system being the most common source of failures [8].

Sharma R.K. and Kumar S. (2007) presented the importance of RAM (Reliability, Availability, Maintainability) analysis, using a Markovian approach to model system behavior and estimate reliability and maintainability at different mission times. The results have proven beneficial for plant personnel, leading to significant improvements in system performance through the adoption of appropriate maintenance policies and strategies [9].

Juang Y.S. at al. (2008), this article presented a genetic algorithm-based optimization formula aimed at improving design efficiency in industrial system, with a focus on balancing system availability, reliability and cost [10].

Krasich M. (2009) determined that one item has "estimated, calculated, averaged" MTBF's or MTTF's since these terms are dependent on various factors such as application stresses, the other items of the system, usage period, stress level etc. [11].

Zhai J. et al. (2013) studied the Mean Time Between Failure, the failure and repair rate and the availability value for Building Cooling Heating and Power (BCHP) System. Combination of the state-space method and Markov model's probabilistic analysis was used for this study [12].

Memon H.H. and Alam M.M. (2016) predicted the failure rate and RAM (Reliability, Availability, Maintainability) of IGBT Triggering System in the marine environment by using MIL-STD 217 and MIL-HDBK 472 and by defining the values of different parameters which includes stress factor, quality factor, temperature factor etc. These results have been able to utilized by the designers and Integrated Logistics Support engineers for the input of resource requirements and life cycle cost analysis [13].

Ferreira F.J.T. E (2016) provided insights into the key considerations surrounding the reliability and operation of high-efficiency motors. By presenting a comprehensive perspective, the advantages, drawbacks, and limitations associated with high-efficiency industrial motors are examined [14].

Liu Y. et al. (2022) Black's mean time to failure (MTTF) equation was applied to predict electromigration life in electronics. It was an empirical equation and at least three datasets have been tested under two temperatures and two temperatures. Cost and time could be saved effectively with reliability tests to predict the electromigration life of electronic products [15].

Duer S. et al. (2023) considered the time between failures as a function of maintainability and the dependability of the Wind Farm as a function of service life [16].

2.2. MTBF Analysis Methodologies

2.2.1 Weibull

One of the key methods discussed in this article used for reliability analysis is Weibull Analysis. According to the book named Practical Weibull Analysis Techniques - Fifth Edition by James A. McLinn; lots of methodologies for Weibull analysis have been investigated. The major advantage of Weibull distribution is that it is widely applicable to lots of reliability, maintainability, test and quality issues. Moreover, the Weibull distribution has widely applicable to analyze Mean Time to Failure and Cycles to Failure.

Weibull formula can be stated commonly as Reliability plus unreliability; which totals equals to 1.0.

$$R(t) + F(t) = 1.0 \tag{1}$$

We may express “F(t) the unreliability function” by using Weibull distribution as following:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (2)$$

This formula can be also seen as:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta-\gamma}\right)^\beta} \quad (3)$$

This alternative formula shows that the offset has an impact on the characteristic life, η .

“f(t) the probability density function” is the time derivative of the “F(t) the unreliability function”. This is:

$$f(t) = \beta \eta^{-\beta} t^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (4)$$

β , η and γ are commonly used for standard Weibull parameters.

β (Beta): Shape parameter. The shape of the time to failure distribution is shown by using β .

η (Eta): Scale parameter where 63.2% of the test units fail.

γ (Gamma): Location parameter where the time to failure distribution actually begins. This value can be positive or negative.

It can be shown Equation 5 that relation between η (characteristic life) and the mean depends on β (Beta) by using the Gamma function. This is:

$$Mean = MTBF = \eta \Gamma(1 + 1/\beta) \quad (5)$$

Γ (The Gamma Function) depends on the value of $1 + 1/\beta$ and these values can be found from special Gamma Function table. In general this correction value can be seen as a little correction to the value of η (eta). Usually this correction value varies between 0.88 and 1.00. And also this correction value can be greater than 1.0 when β is less than 1.0.

2.2.2 MIL-HDBK-217F

The another method explored here is MIL-HDBK-217F. MIL-HDK-217F aims to establish and maintain general methods for analyzing the inherent reliability for the electronic systems in military industry.

This handbook contains two types of method for reliability predictions; namely "Part Stress Analysis" and "Parts Count" methods.

The Part Stress Analysis Method is applied at the later design phase when the detail information is gained. This method also results in lower and close failure rate of system. On the other hand; the Parts Count Method needs less information and is applicable in earlier design phase. This method also results in higher failure rate of system. Part failure rate model of The Part Stress Analysis is difference from part to part. A typical example of the model for discrete semiconductors:

$$\lambda_p = \lambda_b \prod T \prod A \prod R \prod S \prod C \prod Q \prod E \quad (6)$$

λ_p : part failure rate,

λ_b : the base failure rate,

$\prod E$: the environment factor,

$\prod T$: the temperature factor,

$\prod Q$: the part quality factor,

$\prod S$: the stress factor.

In order to apply The Part Count Method part quantities, quality level and application environment information are needed.

$$\lambda = \sum_{i=1}^{i=n} N_i (\lambda_g \prod Q)_i \quad (7)$$

λ : total system failure rate (failures per 106 hours)
 λ_g : the failure rate of the i th part (failures per 106 hours)
 $\prod Q$: the part quality factor of the i th part
 N_i : the quantity of the i th part
 n : the number of different parts in the system.

Drake G. and Corradi G. (2020) determined that in general the probability of failure of electronic components and systems during their useful lifetime tends to have an exponential distribution unit [19].

As a result; after calculating failure rate according to MIL-HDBK-217F, MTBF is calculated based on exponential distribution with the following formula.

$$MTBF = 1/\lambda \quad (8)$$

3. Results

MTBF analysis conducted within the scope of reliability analysis, as mentioned in the previous sections, are commonly performed during the design phase using the MIL-HDBK-217F methodology. The calculation of the MTBF value depends on the environmental conditions in which the system is used, the duty cycle of the subsystems during their missions, the operation and maintenance plans of the system, and the design and quality levels of the components that make up the system. Before the design phase, a reliability target or requirement is determined based on the system's availability ratio or reliability data from existing systems.

The MTBF value of the system can be improved throughout the project with activities such as design revisions, quality improvements, and preventive maintenance. The predicted MTBF value obtained during the design phase serves as input for the work of design teams. The Part Stress Analysis method within MIL-STD-217F was used in calculating the predicted MTBF. During this analysis, reliability block diagrams of the systems were created and the systems of duty cycles, quality levels, operating temperatures, and stress factors of the components were imported to analysis.

It is important to verify MTBF values based on predictions during the design phase with data collected during tests and field use. Because examined systems in the projects are used in the Non-Disclosure Agreements, limited information sharing about the systems and system components was provided in the article. These systems are mission-critical systems used in national defense, operating 7/24 under challenging environmental conditions. These systems consist of various electronic components like resistors, capacitors and connectors. According to user requirements, these systems are subjected to heavy environmental conditions tests. These repairable systems are expected to operate in very short time. Due to Non-Disclosure Agreements, detailed information about these systems cannot be provided.

The failure data of the systems have been recorded for users since the delivery date. Users report faults through Customer Relationship Management (CRM) and Failure Management System when they occur. The responsible ILS support teams and their field teams intervene, resolve the failures, and track them through the Failure Management System. In this context, the data for the systems covered in the article were collected through CRM and Failure Management, as detailed in the following sections.

- Failure Number
- Part Number
- Part Description
- Serial Number
- Failure Description
- Start Date of Usage
- Start Date of Failure
- End Date of Failure
- Time to Failure (Hours)

The dataset collected for the two systems with the mentioned sections was used to calculate the field MTBF value using the Weibull distribution. In order to perform this calculation, the relevant Weibull parameters were first obtained. Using the parameters obtained in accordance with the Weibull formulation, the MTBF value was then calculated.

MTBFs of two systems in defense industry were calculated according to Weibull and MIL-HDBK-217F. When calculating according to Weibull, the field data gathered from delivery time to analyze time was used. When calculating according to MIL-HDBK-217F, the prediction data was used as described previous sections. The results of the analysis can be seen from Table-1.

Table 1. The results of the analysis

Part Number	Inputs*			Outputs	
	Failure Numbers For Field MTBF Calculation	Start Date of Usage	End Date of Failure	Predicted MTBF (MIL-HDBK-217F)	Field MTBF (Weibull)
System-1	190	2018	2023	3208 Hours	14452 Hours
System-2	150	2018	2023	10806 Hours	19998 Hours

* Due to Non-Disclosure Agreements, detailed information about these systems (Part Description, Serial Number, Failure Description, Start Date of Failure, Time to Failure) cannot be provided.

According to the results of the analysis, Field MTBF values which are empirical information for systems are higher than Predicted MTBF values. It can be stated that Field MTBF Calculation method may represent more accurate values for these systems compared to theoretical Predicted MTBF.

4. Discussion and Conclusion

The activities of Integrated Logistics Support (ILS) are carried out to manage all supportability criteria that a system will require throughout its lifecycle under a comprehensive view, ensuring cost effective use and directing the design accordingly. This article, focusing on reliability analysis within the discipline of design interface, addresses ILS activities that play a critical role in developing systems with reliable performance that are both cost-effective and aligned with user expectations.

One of the fundamental parameters used in reliability analysis is MTBF. In this context, the article calculates MTBF data for defense industry systems using two different methods; field MTBF obtained from the Weibull distribution and predicted MTBF obtained from MIL-HDBK-217F. The resulting MTBF values are compared.

Field MTBF was obtained much bigger than predicted MTBF. This big difference was not expected. Because the predicted MTBF is used for estimating spare parts, planning periodic maintenance schedules, planning maintenance labor cost and other Integrated Logistic Support issues. Therefore; the predicted MTBF value is expected to be close to field MTBF value. Probably there can be a correlation between predicted and field MTBF values. In order to find out this kind of correlation, lots of data of systems must be gathered and analyzed. Obtaining accurate data in the reliability discipline is a process that takes many years. Comparing predicted MTBF and field MTBF values is an ongoing controversial.

References

- [1] Kimura, M., Yamada, S., Osaki, S., 1995. Statistical Software Reliability Prediction and Its Applicability Based on Mean Time between Failures, *Mathematical and Computer Modelling*, 149-155.
- [2] Wang, H., Pham, H., 1996. Survey of Reliability and Availability Evaluation of Complex Networks Using Monte Carlo Techniques, *Microelectronics Reliability*, 187-209.
- [3] Angus, J.E., 1988. On Computing MTBF for a k-out-of-n: G Repairable System, *IEEE Transactions on Reliability*, 312-313.
- [4] Kumar, U.D., Knezevic, J., Crocker J., 1999. Maintenance free operating period – an alternative measure to MTBF and failure rate for specifying reliability, *Reliability Engineering and System Safety*, 127-131.
- [5] Elerath, J. G., 2000. Specifying Reliability in the Disk Drive Industry: No More MTBF's. *Annual, Reliability and Maintainability Symposium*, 198-199.
- [6] Dai, Y., Zhou, Y., Jia, Y., 2002. Distribution of time between failures of machining center based on type I censored data, *Reliability Engineering and System Safety*, 377-379.
- [7] Mondro, M. J., 2002. Approximation of Mean Time Between Failure When a System has Periodic Maintenance, *IEEE Transactions on Reliability*, 166-167.

- [8] Carlson, J., Murphy, R. R., Nelson, A., 2004. Follow-up Analysis of Mobile Robot Failures, IEEE International Conference on Robotics & Automation, 4987-4994.
- [9] Sharma, R.K., Kumar, S., 2008. Performance modeling in critical engineering systems using RAM analysis, Reliability Engineering and System Safety, 913-919.
- [10] Juang, Y., Lin, S., Kao, H., 2008. A knowledge management system for series-parallel availability optimization and design, Expert Systems with Applications, 181-193.
- [11] Krasich, M., 2009. How to Estimate and Use MTTF/MTBF Would the Real MTBF Please Stand Up?, Annual Reliability and Maintainability Symposium, 353-359.
- [12] Wang, J., Fu, C., Yang, K., Zhang, X., Shi, G., Zhai, J., 2013. Reliability and availability analysis of redundant BHP (building cooling, heating and power) system, Energy, 531-540.
- [13] Memon, H.H., Alam, M.M., 2016. Reliability, Maintainability, Availability and Failure rate Analysis of IGBT Triggering System Designed for Marine Environment, 13th International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology, 295-299.
- [14] Ferreira, F.J.T.E, 2016. Reliability and Operation of High-Efficiency Induction Motors, IEEE Transactions on Industry Applications, 4628-4637.
- [15] Liu, Y., Gusak, A., Jing, S., Tu, K.N., 2022. Fast prediction of electromigration lifetime with modified mean-time-to-failure equation, Materials Letters, 325p.
- [16] Duer, S., Woźniak, M., Paś, J., Zajkowski, K., Bernatowicz, D., Ostrowski, A., Budniak, Z., 2023. Reliability Testing of Wind Farm Devices Based on the Mean Time between Failures (MTBF), Energies, 1659p.
- [17] McLinn, J.A, 2010. Practical Weibull Analysis Techniques, Fifth Edition.
- [18] MIL-217 Military Handbook, 1991. Reliability Prediction of Electronic Equipment, Department of Defense, Washington DC.
- [19] Drake, G., Corradi, G., 2020. A Reliability Analysis of the Mu2e Calorimeter Front End Amplifier Board, The Mu2e Project, 1-59.

Osmanlı'nın Son Dönemi Ardahan'da İnşa Edilen Camilerde Ekolojik Mimari Tasarım Ölçütlerinin Değerlendirilmesi

Esma Karakoyun Yaşar^{*1}, Z. Özlem Parlak Biçer²,

^{*1}Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümü, NİĞDE
²Erciyes Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümü, KAYSERİ

(Alınış / Received: 24.08.2023, Kabul / Accepted: 20.05.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.08.2024)

Anahtar Kelimeler

Ekoloji,
Tarihi Yapı,
Cami,
Tarihi Yapılarda Ekoloji

Öz: Mimaride ekoloji; Sanayi Devriminin beraberinde getirdiği insan merkezli yaklaşımlar nedeniyle yapı sektöründe meydana gelen savurganlıklar, tüketim alışkanlıkları ve çevresel sorunlara çözüm olarak ortaya çıkmıştır. Yapılan araştırmalarda günümüz mimarisinin önemli bir parçası haline gelen ekolojik mimari yaklaşımların 2000 yıl önceki yapılaşmalarda kullanıldığına ulaşılmaktadır. Bu nedenle ekolojik mimari tasarım anlayışının geliştirilebilmesi için tarihi yapılarda ekolojik yaklaşımların incelenmesi gerekmektedir. Çalışmada zengin coğrafi ve beşerî özelliklere sahip Ardahan'da yer alan tarihi camilerde ekolojik yaklaşımlar değerlendirilerek bu yapıların gerek yerleşim gerek malzeme gerekse de yapısal özellikleriyle iklimsel koşullar ve çevresel özelliklere uyum sağladığının kanıtlanması, bu noktada gerçekleştirilen yerleşim ve uygulama özelliklerinin ortaya konularak gelecek tasarım ve araştırmalara örnek olması hedeflenmektedir. Çalışma sonucunda her üç camide de yerleşim, yönlenme, yönetim gibi çevresel ölçütlerin genel olarak sağlandığına ulaşılmaktadır. Ancak yapıların çatı tipi, rüzgârlık gibi özelliklerinin iklimsel koşulları deneyimleme yoluyla günümüz haline geldiğine ulaşılmaktadır. Bunun yanı sıra yapıların cephe tasarımlarında iklimsel koşullar dikkate alındığı malzeme kullanımında da yerel, yeniden kullanıma uygunluk ve dayanıklılığa dikkat edildiği görülmektedir. Bu kapsamda yapıların özgün veya sonradan eklemeli durumlarıyla ekolojik tasarım ölçütlerini genel olarak sağladıklarını ve bu yönüyle ekolojik mimari tasarıma örnek teşkil ettiklerini söylemek mümkündür. Çalışmanın, yapılacak ve/veya onarılacak camilerdeki tasarım özelliklerine örnek olması beklenmektedir.

Ecological Traces in the Mosques Built in Ardahan in the Last Period of the Ottoman Empire

Keywords

Ecology,
Historical Building,
Mosque,
Ecology in Historical Buildings

Abstract: Ecology in architecture; Due to the human-centered approaches brought about by the Industrial Revolution, the wastes in the construction sector emerged as a solution to consumption habits and environmental problems. Research shows that ecological architectural approaches, which have become an important part of today's architecture, were used in constructions 2000 years ago. For this reason, ecological approaches in historical buildings need to be examined in order to develop the understanding of ecological architectural design. In the study, ecological approaches are evaluated in the historical mosques located in Ardahan, which has rich geographical and human characteristics, and it is proved that these structures adapt to the climatic conditions and environmental characteristics with their settlement, material and structural features, and at this point, the settlement and application features are revealed and set an example for future design and research. It is intended to be. As a result of the study, it was concluded that environmental criteria such as settlement, orientation and management were generally met in all three mosques. However, it is understood that the features of the buildings such as

roof type and windbreak have become what they are today through experiencing the climatic conditions. In addition, it is seen that climatic conditions are taken into account in the facade designs of the buildings, and local, reusable and durability are taken into consideration in the use of materials. In this context, it is possible to say that the buildings generally meet the ecological design criteria with their original or newly added states and in this respect, they constitute an example of ecological architectural design. It is expected that the study will be an example of the design features of mosques to be built and/or repaired.

*İlgili Yazar, email: karakoyunesma88@gmail.com

1. Giriş

İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra meydana gelen endüstri devrimi, sağladığı insan merkezli yaklaşımlar sonucunda çevresel tahribatlar, kirlilik ve kaynakların sınırsız kullanımı gibi sorunlara yol açmıştır. 1970'li yılların sonuna doğru gerçekleşen enerji krizi; çevreye verilen zararın farkına varılmasını ve doğal kaynakların yok olması tehlikesiyle karşı karşıya kalınmasını sağlayarak tüketime dair birtakım önlemler alınması gerekliliğini ortaya koymuştur. Bu kapsamda, enerji tüketiminde ve atık oluşumunda önemli rol oynadığı bilinen yapı sektöründe de tüketim yaklaşımlarının değiştirilmesi gerekliliği doğmuş ve ekolojik mimarlık kavramı ortaya çıkmıştır [1, 2]. Ekolojik mimari, çevre-enerji ve insanın karşılıklı fayda sağlamasıdır. Doğayla uyumlu mimarlık temelinde gelişim gösteren ekolojik tasarımlar; geri dönüşüm, yeniden kullanım, ekolojik malzeme kullanımı, akıllı bina sistemleri, binalarda yenilenebilir enerji kullanımı gibi olguları desteklemektedir [1, 3, 4].

Ekolojik mimarlık kavramının 20. yüzyılda otaya çıktığının söylenmesine rağmen "*doğayla uyumlu mimarlık ve ekolojik mimari tasarım*" kavramları araştırıldığında ekolojik yaklaşımların günümüzden yüzlerce yıl önce yer aldığı kanıtlanmıştır [1, 5, 6]. Tarihi yapıların yapım sistemleri incelendiğinde; dönemin çevresel, ekonomik ve sosyal ölçütlerinin göz önüne alındığı açıkça görülmektedir. Konumları, yönlenme biçimleri, çevresel ilişkileri, yapım sistemleri ve malzemeleri, ısıtma-soğutma, aydınlatma ve havalandırma sorunları sürdürülebilir tasarım çözümlerini oluşturmaktadır. Yapıların boyut, form, yönlenme, mekân organizasyonu ve araziye yerleşimleri yapının bulunduğu bölgenin iklimsel, topografik ve kültürel özelliklerine göre gelişim göstermektedir. Ayrıca bu yapılar döneminin ekolojik yaklaşımlarını yansıtmaktadır [6]. Dolayısıyla geleneksel yapıların çevresel ölçütler doğrultusunda doğaya uyumlu olarak inşa edilmesi ekolojik mimarinin önemli bir kriteridir [5]. Bu kapsamda ekolojik mimarinin temelinde bir takım ekolojik mimari tasarım ölçütleri bulunmaktadır. Çalışmada öncelikle ekoloji, ekolojik mimari, ekolojik mimari tasarım kavramları araştırılmıştır. Daha sonra yapılarda ekolojik yaklaşımların kontrol edilebilirliğinde önemli olan ekolojik tasarım ölçütleri araştırılarak konu üzerinde yapılan çalışmaların analizleri sonucunda çevresel ölçütler ve yapı tasarımı kapsamında enerji korunumu başlıkları altında çalışmanın değerlendirme modeli oluşturulmuştur.

Çalışma kapsamında ekolojinin ortak kullanıma sahip otel, ofis, askeri yapı, okul gibi birçok yapıda araştırıldığına ulaşılmıştır. Buna karşın farklı kullanım süreleri ve yoğunluklarıyla bu yapılardan ayrı değerlendirilmesi gereken camiler hakkında herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bu yönüyle camilerin; tasarımdan yapıya kadar olan süreçlerde bölgesel ve iklimsel faktörler göz önüne alınarak çevresel ve yapısal ölçütler bağlamında incelenmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Günümüz cami yapıları kullanıcı sayısı, iklimsel koşullar, çevresel özellikler, topoğrafyaya yerleşim gibi özellikler göz ardı edilerek tasarlanmaktadır. Bu nedenle yapılarında önemli ölçüde enerji harcanmaktadır. Bu durum, yapıların kullanım aşamalarında ısıtma, aydınlatma, akustik, görsel konfor, havalandırma gibi sorunlara neden olmaktadır.

Çalışmada zengin coğrafi ve beşerî özelliklere sahip Ardahan'da ekolojik yaklaşımlar değerlendirilerek bu yapıların gerek yerleşim gerek malzeme gerekse de yapısal özellikleriyle iklimsel koşullar ve çevresel özelliklere uyum sağladığının kanıtlanması, bu noktada gerçekleştirilen yerleşim ve uygulama özelliklerinin ortaya konularak gelecek tasarım ve araştırmalara örnek olması hedeflenmektedir. Bu kapsamda Ardahan 18. yüzyıl yapılarından Mevlüt Efendi Camii (1701), Müderrisoğlu İbrahim Efendi Camii (1771) ve bu iki camiyle malzeme kullanımı, cephe düzeni, yapım tekniği gibi yönlerden benzer özelliklerde olan 19. yüzyıl yapısı olan Derviş Bey Camii (1868) belirlenmiştir.

Çalışma sonucunda camilerin günümüzde genel anlamda ekolojik şartlara uyum sağladığı söylemek mümkündür ancak camilerin birtakım yapısal özelliklerinin iklimsel koşullara ayak uydurmak amacıyla sonradan eklendiği görülmüştür. Bu durum yapıların deneyimleme yöntemiyle geliştirilerek günümüz yapı tasarımlarına örnek olduklarını göstermektedir. Çalışmada oluşturulan ekolojik mimari tasarım ölçütlerinin gelecek araştırmalara örnek olması ve cami yapılarında ekolojik yaklaşımların yapılacak ve/veya onarılacak camilerdeki tasarım özelliklerinin belirlenmesi için temel oluşturması hedeflenmektedir.

2. Materyal ve Metot

Çalışmada ilk olarak “ekoloji”, “ekolojik mimarlık” ve “ekolojik mimari tasarım” kavramları araştırılmış ve sistematik literatür taramasıyla güncel ulusal-uluslararası literatürde yer alan “ekolojik tasarım ölçütleri” anahtar kelimesiyle araştırma yapılarak belirlenen akademik çalışmalar sınıflandırılıp tablo haline getirilmiştir. Yapılan araştırmada, araştırmacının kullandığı yöntem ile çalışmanın zayıf yönleri analiz edilerek araştırmada kullanılacak ölçütler belirlenmiştir. Çalışma kapsamında seçilen Ardahan ilinin ve camilerin tarihi-mimari özelliklerinden bahsedilmiştir. Belirlenen camilerin yerel mimari ve malzeme kullanımı bağlamında kent kimliğinde önemli bir yere sahip olmaları, literatürde ekolojik açıdan değerlendirilmemiş olmaları ve benzer mimari tasarımlara sahip olmaları önemli olmuştur. Bu camiler; Ardahan 18. yüzyıl yapılarından, özgün işlevinin kilise olabileceği söylenen Mevlüt Efendi Camii (1701) [8] ile ilk işlevi cami yapısı olan Müderrisoğlu İbrahim Efendi Camii (1771) ve bu iki camiyle malzeme kullanımı, cephe düzeni, yapım tekniği gibi yönlerden benzer özelliklerde olan 19. yüzyıl yapısı, özgün işlevinin cami olduğu bilinen Derviş Bey Camii (1868)'dir. Yapılan araştırmada seçilen cami yapıları; çevresel ve yapısal özellikleri ile ele alınmıştır. Yapıların analizinde günümüz mevcut halleri dikkate almak durumunda kalınmıştır. Bu özellikler ekolojik mimari tasarım ölçütleri ışığında değerlendirilerek çalışmanın yeni yapılacak veya onarılacak camilere örnek teşkil etmesi için önerilerde bulunulmuştur.

3. Ekolojik Mimari Tasarım

Ekoloji, canlı organizmaların çevre ile arasındaki ilişkiler bütününcü incelendiği, insan ve doğa kaynaklarının rasyonel olarak kullanımıyla ürünün yapımından yok oluşuna kadar geçen aşamalarda çevresel zararların en aza indirgenmesi ve gelecek nesillerin ihtiyaçlarının nasıl karşılanacağı üzerine çalışmalar yapan bilim dalıdır [1, 9, 10]. Ekoloji kavramı 1960'larda çevresel sorunların baş göstermesiyle gündeme gelmeye başlarken ortaya çıkışındaki ana etken endüstri devrimidir. İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra meydana gelen endüstri devrimi, insanların hayatlarını kolaylaştırmak adına pek çok alanda “insan merkezli yaklaşım” anlayışını da beraberinde getirmiştir [11]. Ancak insan merkezli yaklaşımlar sonucunda çevresel tahribatlar, kirlilik ve kaynakların sınırsız kullanımı gibi olumsuzlukların önü açılmıştır. 1970'li yılların sonuna doğru ortaya çıkan enerji krizi; çevreye verilen zararın farkına varılmasını, kaynak yetersizliği ve kıtlık kavramlarıyla yüzleşmesini sağlayarak tüketime dair birtakım önlemler alınması ve üretim odaklı çalışmalar yapılması gerekliliğini ortaya koymuştur. Bu kapsamda, yapımından yıkımına kadar her aşamasında teknolojik yenilikler, kültürel-sosyal ve çevresel koşullar ile çağın gerektirdiği uygulamalar sebebiyle enerji tüketiminde [11, 12] önemli rol oynadığı bilinen yapı sektöründe de tüketim yaklaşımlarının değiştirilmesi gerekliliği doğmuş ve mimaride ekolojiyi tanımlamak adına ekolojik mimarlık ve ekolojik mimari tasarım kavramları ortaya çıkmıştır [11]. Dolayısıyla mimaride ekoloji konusu için bu kavramların açıklanması önemli görülmüştür.

Enerji, “*bir cisim tarafından taşınan ve iş üretmeye yarayan güç*” olarak tanımlanmaktadır [13]. Bu yönüyle enerjiyi bir sistemin iş yapabileceği sınırı olarak açıklamak mümkündür. Mimaride yapının yapım-kullanım ve yıkım aşamalarında, yapı malzemelerinin üretiminde ve geri dönüştürülmesinde, atık yönetimi gibi alanlarda kullanılmaktadır [14, 15, 16].

Ekolojik mimarlık; enerji verimliliğinin amaçlandığı, etkin yalıtımlı, doğal aydınlatma ve geri dönüşümün önemli olduğu ve kendi enerjisini üretebilen çevre dostu mimarlık yaklaşımıdır [13]. Kısa Ovalı (2009) çalışmasında Drings (1990) ve Hegger'in (1997) ekolojik mimarlığı bina yapım, kullanım, yıkım veya yenilenmesi sırasında yapı malzemelerinin doğayla uyumlu olması ve çevreye zarar vermemesi olarak açıkladıklarını belirtmektedir [3]. Wachberger ve Wachberger (1988) ise ekolojik mimarlığı bölgesel iklim şartlarına ve topoğrafyaya uyumlu, yenilenebilir enerji kaynaklarının etken veya edilgen olarak kullanımını amaçlayan toprak, su, hava ve yeşil alanlara saygı temelli binalar inşa etme anlayışı olarak ele almaktadır [17]. Geisler (1997) ekolojik mimarlığın, yaşam döngüsü boyunca kullanıcıların günümüz ve gelecek ihtiyaçlarının karşılanmasını sağlama odaklı bir yaklaşım olduğunu belirtmiştir [18]. Tönük'e (2001) göre ekolojik mimarlık, bir çevrenin yapımında ve kullanımında doğayla uyumlu mimarinin sağlanmasıdır [1]. Yılmaz 'a (2007) göre ekolojik mimarlık, geri dönüşümün esas olduğu ve binanın yapımından yıkımına kadar geniş bir perspektifle ele alınarak çevresel zararın minimize edildiği bir mimarlık konseptidir [19]. Bozdoğan (2003) ve Uffelen (2009) ekolojik mimarlığı, çevresel etkilerin minimuma indirgenerek doğal kaynakların korunması, yaşam kalitesinin artırılması ve toplumsal refahın sağlanması olarak tanımlamıştır [20, 21]. Türkmenoğlu Bayraktar (2011) ve Alparslan vd. (2009) ekolojik mimarlığı, yapı ve yerleşimlerin tasarımında fiziksel çevre koşullarının kontrol edildiği doğal ortamların korunumuna önem verilen, sağlıklı, dönüştürülebilir ve doğal malzemelerin kullanılarak az enerji tüketen, bakımı ekonomik ve kolay olan bina yaklaşımı olarak açıklamıştır [22, 23]. Porteous' a (2013) göre ekolojik mimarlık, ekosistem içindeki canlı ve cansız tüm unsurları göz önünde bulundurarak bina tasarımı ve üretme sürecidir [24]. Kısa Ovalı (2009) ise “insana duyarlı, fiziksel çevreyi geniş bir perspektifle ele alan, bina yaşam döngüsü boyunca tüm girdi ve çıktılarını ekolojik sistemle uyumlu olduğu, olgu olarak tanımlanmaktadır [3]. David (1992) ve

Ken (1996) çalışmalarında ekolojik mimariyi yapıların doğaya uyumlu şekilde entegre edilmesine yönelik bir tasarım yaklaşımı olarak tanımlamaktadır [25, 26]. Kleiner'a (2003) göre ekolojik mimarlık; ısıtma, soğutma, havalandırma veya sıcak su temini gibi enerji alanlarında ve su kullanımında tasarruf edecek enerji korunumlu binalar inşa etmektir. Kleiner bunun yanı sıra ekolojik mimaride yeşilin korunması ve iyileştirilmesinin de önemini vurgulamıştır [27]. Buna ek olarak Crowther (1992) ekolojik mimarlıkta yapının araziye yerleşiminde arazinin doğal formunun korunması, mevcut durumu bozacak hafriyat ve dolgu gibi maliyeti yüksek uygulamalardan kaçınılması gerektiğini [2], Roaf (2003) ise ekolojik mimarlık anlayışında, binaların ekosistemin bir parçası ve yaşayan bir ortam olarak ele alınması gerekliliğini vurgulamıştır [28].

Literatürde ekolojik mimariyi açıklamak üzere ortak veya birbirinden farklı yaklaşımlar yer almaktadır. Bu yaklaşımlar belirli bir proje veya yapım işinin ekolojik mimariye uygun şekilde tasarlanmasında ekolojik prensiplerin temelini oluşturmakta ve bina planlaması, doğal aydınlatma, havalandırma, su kullanımı, enerji verimliliği gibi unsurları içeren detaylı kriterler oluşturulmasında örnek teşkil etmektedir [29]. Yapılan literatür taramaları sonucunda ekolojik mimariyi, ekosistemdeki her canlıya saygı duyulması temeliyle ortaya çıkan üretim odaklı, doğaya ve çevresel koşullara uyumlu, iklimsel verilerin önemsendiği, tasarım aşamasında verilen her kararın yapının kendi kaderi ve ekosistemin kaderinde önemli rol oynadığının farkında olunarak minimum enerji tüketiminin olduğu, geri dönüştürülebilir ve az maliyetli yapı tasarlama olgusu olarak açıklamak mümkündür.

Ekolojik mimari tasarım ölçütleri

Ekolojik tasarım; ekoloji-çevre ve enerji konularında ortaya çıkan olumsuzluklara karşı "azaltmak", "yeniden kullanmak", "geri dönüştürmek" ve "iyileştirmek" yaklaşımlarıyla çözüm aramaktır [30]. Günümüzde ekolojik mimari tasarım, modern mimari yapım örneklerinde aktif sistemlerin kullanımıyla sağlanmaya çalışılmaktadır ancak eski yapılar incelendiğinde geleneksel yapım sistemlerinin çevreye herhangi bir zarar vermediği aksine doğayla büyük bir uyum içerisinde olduğuna ulaşılmıştır. Geleneksel yerleşimlerde amaç doğayla çatışmadan mevcut kaynakları kullanarak doğal dengeye zarar vermeyecek çözümler üretilmesi olup bu yönüyle geleneksel yapıların ekolojik ve sürdürülebilir özellikler taşıdıklarına ulaşılmaktadır [31]. Bu doğrultuda geleneksel yerleşimlerin ekolojik mimari çerçevesinde değerlendirilmesi gerekliliği doğmuştur. Mimaride ekolojik tasarımın yapılarla ilişkilendirilmesi noktasında ise ekolojik tasarım ölçütleri devreye girmektedir [28]. Bu kapsamda çalışmada ekolojik mimari tasarım ölçütleri ulusal-uluslararası güncel literatürde (2000 yılından sonrası) yer alan çalışmalar araştırılarak daha önce oluşturulmuş kriterlerin neler olduğu ve belirlenme yöntemleri hakkında veri toplanmış daha sonra çalışmanın bu aşamadaki zayıf yönleri belirlenmiştir (Ek 1).

Araştırma sonucunda ekolojik mimari tasarım ölçütlerinin farklı yöntem ve başlıklarla değerlendirildiği tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan analizler sonucunda literatür taramasının daha sistematik ve geniş olduğu modeller harmanlanarak araştırmanın ekolojik tasarım ölçütlerinin oluşturulması sağlanmıştır (Tablo 1).

Çalışmada ekolojik mimari tasarım; fiziksel çevre ölçütleri, yapısal tasarım ölçütleri ve enerji etkin sistemler başlıklarında irdelenerek tablolaştırılmıştır. Tabloda ölçütün sınırı genelden özele sıralanmış daha sonra da ölçütün sağlanması için gerekli kriterler verilmiştir (Tablo 1). Bu kapsamda ilk olarak yapının arazi seçimi değerlendirilmelidir. Arazi seçimleri yapılırken ekolojik değerinin düşük olması birincil kısıttır. Daha sonra yapının seçilen arazinin topografik özelliklere uygun inşa edilmesi mevcut doğal ve yapay çevreyi bozmadan yönlenmenin sağlanması gerekmektedir. Yapılara toplu taşıma ile ulaşım sağlanması, yaya ulaşımının desteklenmesi ve kentsel donatılara uygun olması kirlilik ve kaynak tüketimi bakımından önemlidir. Bunun yanı sıra yapının tasarım-yapım-yıkım ve yıkım sonrası aşamalarında yapılan planlamalarla yönetiminin sağlanması ekolojik mimari tasarımda önemli rol oynamaktadır. Yapılarda seçilen malzemelerin kolay ulaşılabilir/yerel olması, dayanıklılığı, geri dönüştürülebilir ve tekrar kullanıma açık olması kaynak tüketiminin, yapı kullanım ömrü ve iş gücü kullanımının, maliyetin ve boşa harcanacak hareketlerin minimalize edilmesini sağlamaktadır [5, 11].

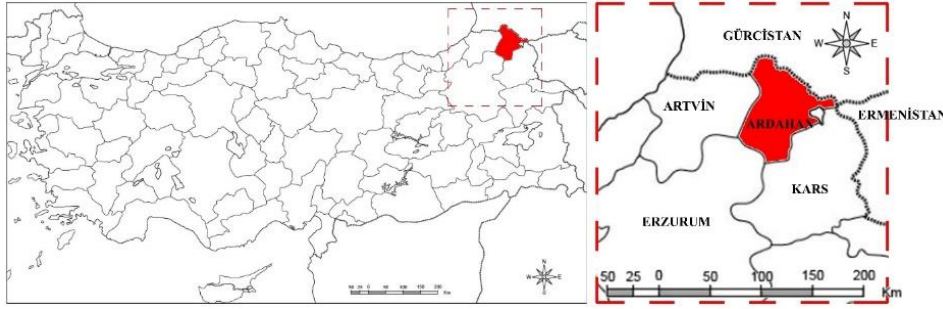
Yapısal tasarımda bina yakın çevresi ve binanın kendi tasarım özellikleri değerlendirilmektedir. Buna ek olarak mekân dizilimi, binanın kabuğu ve malzeme seçimi de bu yönüyle önemli olup bölgenin iklimsel koşullarına uygunluk sağlanması ekolojik mimari tasarımın gereksinimlerindedir. Yapılarda iç hava kalitesi yapıda kullanılan malzemenin güvenilirliğini ve sağlığa etkilerini göstermektedir. Yapının termal ve akustik konforu ise yapıda yalıtım, cephe tasarımı veya sonradan eklenen donatılarla insan konfor şartlarına uyumun gözetilerek ek maliyet ve giderlerin engellenmesini hedeflemektedir. Buna ek olarak yapılarda kullanılan enerji etkin sistemler de enerji korunumu ve kazanımının sağlanmasıyla ekolojik mimari tasarımı desteklemektedir [5, 25].

Tablo 1. Ekolojik tasarım ölçütleri

Fiziksel Çevre Ölçütleri	Topografya		
	Politik		
Fiziksel Çevre Ölçütleri	Arazi seçimi	Yapılaşmış bir bölgede arazi seçimi Ekolojik değeri düşük arazi seçimi Açık kamusal alana yakın arazi seçimi	
	Araziye yerleşim	Doğal ve yapay çevre ile uyum sağlanması Topografik yapıya uygun yerleşim sağlanması Yönlenme Kompakt gelişmenin desteklenmesi	
Fiziksel Çevre Ölçütleri	Ulaşım	Toplu taşıma erişilebilirliğinin yeterli düzeyde sağlanması Yerel olanaklara ve kentsel donatılara yakınlık Yakın çevrenin yaya kullanımına uygun olması	
	Yönetim	Yapının sürdürülebilir yönetiminin sağlanması (Yapı hakkında verilen kararlar, mevcut işleyiş durumu) Yağmur suyu yönetimi ve su tüketiminde azaltma var olan yapı/yapı alt bileşeni/malzemenin yeniden kullanılması Atık yönetimi <ul style="list-style-type: none"> • Yeniden kullanılabilir malzeme kullanılması • Dönüştürülmüş içerikli malzeme kullanılması • Kolay geri dönüştürülebilir malzeme kullanılması • Doğada kolay yok olan malzeme kullanılması 	
Fiziksel Çevre Ölçütleri	Ekonomi ve maliyet	Yapım aşamasında fiziksel ve mali yükler Kullanım aşamasında gerekli tadilat ve enerji kayıpları (aydınlatma maliyeti- ısıtma maliyeti) Yıkım aşamasında harcanacak maliyet ve atık kaldırma	
	Yapısal Tasarım Ölçütleri Kapsamında Enerji Korunumu	Bina yakın çevre tasarımı ölçeğinde	Bina aralığı, yüksekliği ve konumlandırılış durumlarının güneş ışınımı bakımından uygunluğu Bina aralığı, yüksekliği ve konumlandırılış durumlarının rüzgâr hareketi bakımından uygunluğu Bina aralığı, yüksekliği ve konumlandırılış durumlarının ortalama sıcaklık bakımından uygunluğu Bina aralığı, yüksekliği ve konumlandırılış durumlarının ortalama yağış bakımından uygunluğu Peyzaj düzenlemesinin uygunluğu
Bina tasarımı ölçeğinde		Bina biçim ve formunun iklimsel koşullara uygunluğu Çatı yüksekliği, malzemesi ve tipinin iklimsel koşullara uygunluğu Bina cephe tasarımının iklimsel koşullara uygunluğu	
Mekân tasarımı ölçeğinde		Mekânların bina içerisindeki konumlandırılış durumunun uygunluğu Mekânların plan organizasyonundaki yerinin uygunluğu Mekânların yönlendirilmesinin uygunluğu Mekânların boyut ve biçiminin uygunluğu	
Bina kabuğu tasarımı ölçeğinde		Dış duvarların uygunluğu Kapı/pencere boşluklarının uygunluğu Katmanlı cam kullanımı Yalıtım	
Malzeme seçimi ve kullanımında		Enerji etkin malzeme kullanılması Yerel malzeme kullanılması Uygun ısı depolama kapasitesine sahip malzeme kullanılması Doğaya uyumlu malzeme kullanımı Dayanıklı malzeme kullanımı	
Yapısal Tasarım Ölçütleri Kapsamında Enerji Korunumu		Görsel konfor	Mekânların uygun bir şekilde gün ışığından yararlanması Çalışma düzleminde gökyüzü görüşü sağlanması Dışarı ile görsel iletişim kalitesinin yüksek olması
	İç hava kalitesi	Kirlenmeye meyilli malzeme kullanılması Mekânların doğal yolla havalandırılması	
	Termal konfor	Yapı tasarımına bağlı olarak termal konforun sağlanması	
	Akustik konfor	Arazi seçiminde ve yapı tasarımında dış sesi önleyici tedbirlerin alınması	
	Erişilebilirlik	Bina girişinin erişilebilir olması Yapıdaki piyes merdiveninin erişilebilir olması	
	Mekân ve çevre kalitesi	Yapının kullanıcılarına ait bahçe, avlu vb. kişisel alan olması Yapı çevresinde rekreasyon alanlarının olması Ulusal mekân standartlarının sağlanmış olması Esneklik ve uyarlanabilirliğin mümkün olması Yapının afet riski taşımayan bir bölgede yer alması Yapı kullanımının uygunluğu	
Enerji Etkin Sistemler	Pasif Sistemler	Doğrudan kazanç	Saydam yüzeyler (Pencereler, Çatı açıklıkları)
		Dolaylı kazanç	Trombe duvarı Çatı Havuzu Güneş odası (Sera) Çift cidarlı cephesel sistemler Güneş bacası
	Aktif Sistemler	Bu bölümde binaya entegre edilen sistemler yer almakta ve çalışmanın ana konusu olmadığı için değerlendirilmeye alınmamaktadır.	

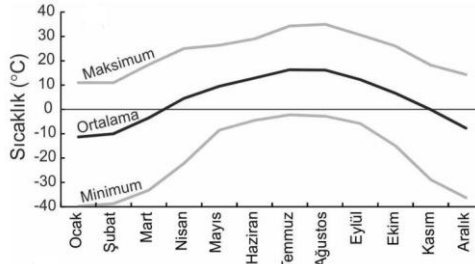
4. Alan Çalışması

Ardahan ili, Doğu Anadolu Bölgesi'nin kuzeyinde yer almaktadır. Deniz seviyesinden 2000- 2200 m yükseltide plato özelliği gösteren Ardahan ili merkez yüzölçümü 1460 km² civarındadır (Şekil 1). Ardahan ili su kaynakları bakımından zengin olup Kura Nehri, Çıldır ve Aktaş Gölleri ilin önemli hidrolik unsurlarındandır [32].



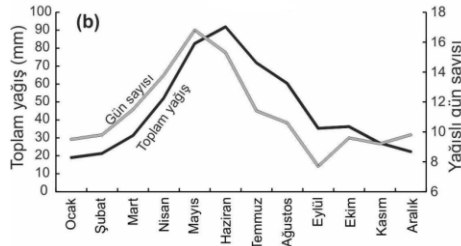
Şekil 1. Ardahan ilinin Türkiye haritasındaki yeri

Ardahan ili Köppen-Geiger iklim sınıflandırmasına göre kış mevsiminin soğuk, yaz mevsiminin ılık ve her mevsim yağışlı nemli orta enlem iklim tipi içerisinde yer almaktadır [33]. Alanda kışların uzun ve sert, yazların kısa ve yağışlı olduğu sert karasal iklim özellikleri görülmektedir. Kentin meteoroloji istasyonu verilerine göre yıllık ortalama sıcaklığı 3,8 °C; aylık ortalama sıcaklığı ise 5 ay 0 °C altında olan Ardahan, Türkiye'nin en soğuk kesimleri arasında yer almakta kışın yağın kar yağışı ve don olayları kalıcı kar sınırı ve süresinin artmasına neden olmaktadır. Bunun yanı sıra kentte ortalama sıcaklığın en yüksek olduğu ay 16,4 °C ile Ağustos; en düşük olduğu ay ise -11,4 °C ile Ocaktır [32] (Şekil 2).



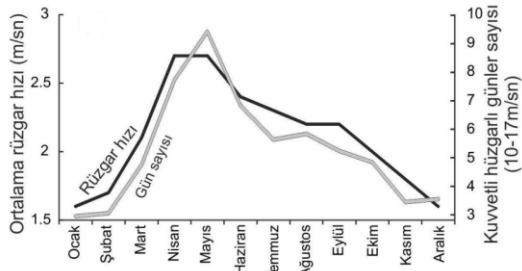
Şekil 2. Ardahan Ortalama Sıcaklık Verileri [34]

Çalışma alanında yıllık yağış miktarı 551 mm olup en fazla yağışı Mayıs (82 mm) ve Haziran (92 mm) en az yağışı ise Aralık (22 mm) ve Ocak (19 mm) aylarında aldığına ulaşılmaktadır. Mevsimsel olarak yağışın %41'i yaz aylarında %30'u ise ilkbahar aylarında düşen kentte yıllık ortalama yağışlı gün sayısı 135 gündür [32, 33] .

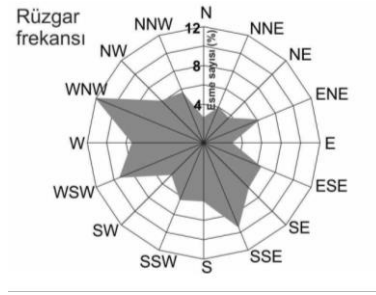


Şekil 3. Ardahan Ortalama Yağış Verileri [34]

Ardahan ortalama rüzgâr hızı 2.1 m/sn iken maksimum rüzgâr hızı 32 m/sn hıza kadar ulaşmaktadır. Bu değerlerden ortalama rüzgâr hızının en fazla olduğu dönem Nisan ve Mayıs aylarıdır. Yapılan çalışmalarda yağışlı gün ve kuvvetli rüzgârlı gün sayısında yüksek korelasyon değeri ($r=0.78$) olduğuna dolayısıyla yağışlı günlerin genel olarak rüzgârlı geçtiğine ulaşılmaktadır. Buna ek olarak yıllık ortalama esme sayıları doğrultusunda ilde birden fazla hakim rüzgâr yönü bulunmuş bu kapsamda en yüksek değerlere %12, %9,5 ve %9,5 oranlarıyla WNW(batı- kuzeybatı), WSW(batı- güney batı) ve SSE(güney- güneydoğu) yönlerinde ulaşılmaktadır. Dolayısıyla güney ve batı yönlü rüzgârların egemen olduğunu söylemek mümkündür [34] (Şekil 4, 5).



Şekil 4. Ardahan Ortalama Rüzgâr Verileri [34]



Şekil 5. Ardahan İli Rüzgâr Frekansısı [34]

Coğrafi ve iklimsel verilerinin yanı sıra Ardahan geçmişten günümüze birçok uygarlığa ev sahipliği yapmasıyla çeşitli kültürlerle tanışıklık etmiştir. Uygarlıkların yerleşimi 12. yüzyılda Kıpçaklar ile başlayıp Atabekler, Akkoyunlular ve Türkmenler olarak 15. yüzyıla kadar sürmüştür [35, 36]. Daha sonra Osmanlı İmparatorluğunun genişleme politikası çerçevesinde 16. Yüzyılda Osmanlı hakimiyetine girmiştir. 1828'de Ruslar Ahıska'yı düşürüp Ardahan'ı işgal etmiş [37] ve kent kırk yıl kadar Rus hakimiyetinde kalmış; 1877-1878 yıllarında gerçekleşen Osmanlı Rus savaşı ile şehir tekrar Osmanlı İmparatorluğu hakimiyetine girmiştir. Cumhuriyetin ilanından sonra 1992 yılında il olmuştur [37]. Uzun süre Osmanlı İmparatorluğu'nun hakimiyeti altında kalan kent, mimari özellikleriyle zenginleşmiş ve coğrafi konumuyla birlikte özellikle cami mimarisinde bölgeye önemli bir değer kazandırmıştır. Bu sebeple cami yapılarının değerlendirilmesi önemli olup çalışma kapsamında ilk olarak camiler hakkında kısa bir değerlendirme yapılması gerekliliği doğmaktadır.

İlk cami; kare planlı, dört duvardan oluşurken harim (Dış avlu, camilerde topluca namaz kılınan ana mekân), harem (iç avlu), son cemaat yeri, minare, şadırvan ve imam-müezzin odalarının yer aldığı bir kurguya dönüşmüştür [13]. Yapıldığı dönemin sanat ve mimari anlayışına göre şekillenen camilerde dönemin teknolojik özelliklerine, malzeme ve yapım tekniklerine, iklim, topografya, coğrafi özellik ve ihtiyaçlarına göre üslup farklılıkları ortaya çıkmıştır. Bu kapsamda Emevi, Abbasi, Memlük, Selçuklu ve Osmanlı dönemi camilerinin birbirlerinden farklı olduğu görülmektedir [37]. Ancak Türkiye'de yapılan son dönem camilerinde genellikle taşeronlar tarafından yapılan tip projeler ve birbirinin benzeri şekillerde süregelen camiler görülmektedir.

Camilerin tarihi gelişim sürecinde temel adımlar Selçuklu döneminde atılmışken günümüz klasik cami planlamasına Osmanlı'nın öncülük ettiği bilinmektedir. Osmanlı cami mimarisini İznik ve Bursa gibi merkezlerde başlayıp; Erken Dönem Osmanlı (1299-1501), Klasik Dönem Osmanlı (1501-1703) ve Geç Dönem Osmanlı (1703-1923) olarak dönemlere ayırmak mümkündür [37]. Erken dönem Osmanlı camileri, cami mimarisinin gelişiminde önemli bir role sahiptir. Erken dönem Osmanlı camileri tek kubbeli, ters T planlı, çok ayaklı- çok kubbeli camiler olarak üç şekilde gelişmiştir. Klasik dönem Osmanlı camileri (1501-1703) içerisinde Mimar Sinan yapıları da yer almaktadır. Bu camilerde çapı büyütülen kubbe yardımıyla iç mekân genişletilmiştir [38]. Geç Osmanlı camileri ise; III. Ahmet Dönemi'nde (Lale Devri) inşa edilmeye başlanmıştır. Bu dönemde Barok ve Rokoko üslupları benimsenmiştir. Daha sonraki süreçlerde farklı üslupların birleşiminden oluşan eklektik adı verilen yeni bir üslup gelişmiştir [39]. Çalışma kapsamında belirlenen camiler, Ardahan ilinde yer alan 18-19. Yüzyıl yapıları olup yapım yılları Osmanlı'nın son dönemleri olarak belirlenmiştir.

Ardahan il merkezinde dört tane son Osmanlı Dönemi olduğu düşünülen cami bulunmaktadır. Bu camiler Mevlüt Efendi Camii (1701), Müderrisoğlu İbrahim Efendi Camii (1771), Derviş Bey Camii (1868) ve Halil Efendi Camii'dir. Bu camiler Ardahan kent merkezi, Halil Efendi Mahallesi, ikinci derece arkeolojik sit alanı olarak tanımlanmış, şehrin ilk yerleşim yerinin bulunduğu eski kent merkezinin çeperindedir (Şekil 2). Halil Efendi Camii (Yanık Camii) Osmanlı Rus Savaşı'nda Rus ve Ermeni birlikleri tarafından tahrip edilmiş daha sonra da 1915 yılında Ermeni çeteler tarafından yaklaşık 300 Müslüman Türk içindeyken yakılmıştır [40]. Günümüzde Yanık Cami olarak bilinen yapının sadece sonradan yapılmış bir kitabesi bulunmaktadır. Dolayısıyla araştırmada yer almamıştır. Çalışmada 18. yüzyıl, benzer mimari tasarım, yapım tekniği, malzeme kullanımı gibi özelliklerde, özgün işlevinin kilise olduğu söylenen Mevlüt Efendi Camii (1701) [8] ile orijinal kullanımı cami olan Müderrisoğlu İbrahim Efendi Camii (1771) ve bu camilerle benzer özelliklerde olan, 19. yüzyıl yapısı, Derviş Bey Camii (1868) seçilmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. Ardahan da incelenen yapıların konumu (Google Earth, 2023)



Mevlüt Efendi Camii (1701)



Müderrisoğlu İbrahim Efendi Camii (1771)



Derviş Bey Camii (1868)

Şekil 7. Ardahan kent merkezi geç Osmanlı dönemi camileri

4.1. Mevlüt Efendi Camii (1701)

Mevlüt Efendi Camii, Ardahan Merkez Halil Efendi Mahallesinde, Ardahan Kalesi'nin yaklaşık 150-200 m. batısında yer almaktadır (Şekil 6). Cami kitabesinden inşa edilme tarihinin 1701 (H. 1113) olduğuna ulaşılmıştır [41]. Günümüzde bu kitabenin sonradan kuzey cepheye yapılan ek bölümden dolayı kapatıldığı düşünülmektedir (Şekil 7-a). Bölge halkı tarafından yapının aslen kilise olduğu ancak daha sonra camiye dönüştürüldüğü söylenmektedir [8]. Caminin 1990'lı yıllarda geçirdiği restorasyonla taşıyıcı duvarlarının bir kısmı ve üst örtüsünün yenilenmesine [41] rağmen 2011 [8] ve 2015 [42] yıllarında tekrar kapsamlı restorasyon geçirdiği bilinmektedir. Ardahan Mevlüt Efendi Camii, dikdörtgen plan tipine sahip olup girişi kuzey cephesinden ilk olarak rüzgârlık daha sonra ana kapıdan sağlanmaktadır. Cami girişinin sağ tarafında ayrılmış bir oda bulunmaktadır. Sol tarafında sonradan yapılmış ahşap merdivenle kadınlar mahfiline ulaşım sağlanmaktadır (Tablo 2). Caminin üst örtüsü ilk inşa edildiğinde toprak dam [43] olup iklim şartları sebebiyle oluklu sac malzemeli kırma çatı yapılmıştır (Şekil 8).

Tablo 2. Mevlüt Efendi Camii

Yapım Yılı: 1701 (H. 1113)	a. Vaziyet Planı	b. Plan

Yapının girişi kuzey cephesinden olup kış şartlarının elverişsiz olması sebebiyle bu cepheye sonradan tuğla yığma sistemli rüzgârlık bölümü eklenmiştir. Bu durum caminin kuzey cephesinin özgünlüğünü kaybetmesine sebep olmuştur (Şekil 8-a). Güney cephesi alt sırasında özgün olduğu düşünülen dikdörtgen bazalt taş söveli, tek kanatlı, çift cidar iki pencere yer alırken üst sırada sonradan yapıldığı düşünülen üç çift cidar pencere bulunmaktadır (Tablo 2). Caminin batı cephesinde alt sırada iki; doğu cephesinde ise alt sırada iki, üst sırada üç pencere açıklığı olmak üzere beş tane, orijinal olduğu düşünülen çift cidar pencere bulunmaktadır (Tablo 2, Şekil 8-b).

Yapı günümüzde doğal gazla çalışan kaloriferli sistemle ısıtılmaktadır. Bunun yanı sıra yapı içinde sonradan eklenen bir oda bulunmakta ve soğuk kış aylarında bu oda elektrikli ısıtıcıyla ısıtarak cemaatin kullanımına sunulmaktadır.



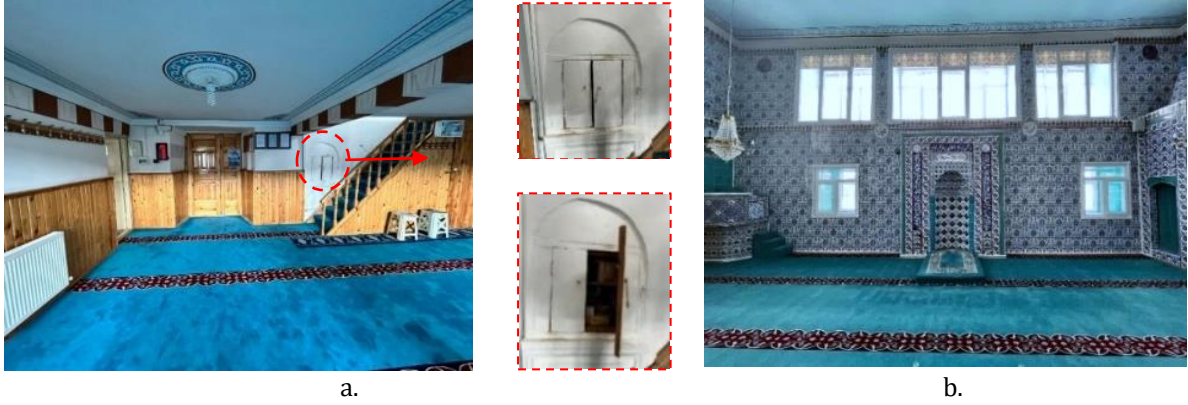
Şekil 8. Ardahan Mevlüt Efendi Camii cepheleri

Cami özgün kapısı; dikdörtgen taş silmelerle çevreli, yuvarlak kemerlidir. Günümüzde sonradan yapıldığı bilinen ahşap dolgulu, çift kanatlı bir kapısı bulunmaktadır (Şekil 9). Kapı kemerinin sağ (Şekil 9-a) ve sol üzengi taşlarında iki adet sütun başlığı yer alırken kilit taşına işlenmiş bir rozet görülmektedir (Şekil 9-b).



Şekil 9. Ardahan Mevlüt Efendi Camii ana kapısı

Cami girişinde Rus Döneminde 1887 yılında eklenmiş bir günah çıkarma bölmesi bulunmaktadır. Bölme günümüzde kitaplık nişi olarak kullanılmaktadır (Şekil 10-a) [42]. Harim girişinin sağ tarafında yer alan imam odası ile sol tarafında yer alan ahşap kaplama merdiven ve ahşap asma kat yapının geçirdiği bir restorasyon sonucunda eklenmiştir (Şekil 10, 11). Caminin içine yaklaşık 1,50 m. yüksekliğine kadar ahşap lambri kaplamalar yapılmış, güney duvarı hariç tüm duvar ve destekler beyaz alçı ile kaplanmıştır (Şekil 10, 11). Mihrabın da yer aldığı güney duvarda ise boydan boya beyaz ve mavi renkli çini kaplamalar yer almaktadır. Bu süslemeye sonradan eklenen mihrap da dahildir (Şekil 10-b). Yapılan restorasyonlar sonrasında yapının iç mekânı özgünlüğünü kaybetmiştir [42, 43].



Şekil 10. Ardahan Mevlüt Efendi Camii sonradan eklenen ahşap kaplama merdiven ve günah çıkarma bölgesi (a), güney duvar iç görünüşü çini kaplamaları (b)



Şekil 11. Ardahan Mevlüt Efendi Camii kuzey duvar iç görünüşü sonradan eklenen kadınlar mahfili ve oda

4.2. Ardahan Müderris İbrahim Efendi Camii (1771)

Müderris İbrahim Efendi Camii, Ardahan Merkez Halil Efendi Mahallesi'nde, Ardahan Kalesi'nin yaklaşık 100 m. kuzey batısında bulunmaktadır (Şekil 6). Kentin 18. yüzyıldan günümüze ulaşabilen en önemli yapıları [8] olmasının yanı sıra Ardahan Dedeşen Köyü Camii'nden sonra ayakta kalan en eski cami olarak bilinmektedir [41]. Kareye yakın planlanmış caminin girişi Mevlüt Efendi Camii'nde de olduğu gibi yuvarlak kemerli, dikdörtgen silmelerle çevrelenmiş bir çerçeveye sahiptir (Tablo 3). Giriş kapısının üstündeki yuvarlak kemerin içinde yer alan kabartma kitabe Osmanlıca "Amel-i Osman sene 1185 (M. 1771-72) yazılmakta ve bu tarihin caminin inşa tarihi olduğu düşünülmektedir. Bunu yanı sıra bu tarihin kapı ustası tarafından atıldığı da tahminler arasındadır (Şekil 14-a) [8].

Tablo 3. Ardahan Müderris İbrahim Efendi Camii (b; [26], c; [8])

Müderris İbrahim Efendi Camii			
Yapım Yılı: 1771	a. Vaziyet planı	b. Plan	c. Plan

Müderrisoğlu İbrahim Efendi Camii; Rus istilası döneminde, samanlık ve depo olarak kullanılmış olması sebebiyle bazı bozulmalara maruz kalmıştır [41]. 78 yıl önce açık artırmayla 15 liraya satılarak samanlık olarak kullanıldığı

bilinen bu tarihi cami, mülk sahipleriyle anlaşma yapıp restore edilerek 2017 yılında ibadete açılmıştır (Şekil 9-a) [44]. Müderrisoğlu İbrahim Efendi Camii'nin özgün üst örtüsü düz dam (Şekil 12) olup sonradan oluklu sac kaplaması ile kırma çatı yapılmıştır. Caminin bahçesinde sonradan eklenmiş ek bir yapı (abdesthane) yer almaktadır (Şekil 12-a). Bahçe girişi kuzeybatı yönündendir. Müderrisoğlu İbrahim Efendi Camii'ne ilk olarak batı yönündeki sonradan eklenen rüzgârlıktan girilerek (Şekil 12, 13) kuzey cephesinde yer alan ana girişe ulaşılmaktadır. Müderrisoğlu İbrahim Efendi Camii planı dikdörtgen yapıda olup üst örtüsü iki ahşap sütun ile desteklenmektedir. Harim girişinin sağ tarafında ahşap asma kat kadınlar mahfiline ulaşım için kullanılan ahşap bir merdiven bulunmaktadır. Harim batı ve doğusunda ahşap korkuluklarla çevrelenmiş son cemaat alanı yer almaktadır.



Şekil 12. Ardahan Müderris İbrahim Efendi Camii kuzey cephesi restorasyon öncesi (a)[30], restorasyon sonrası (b)

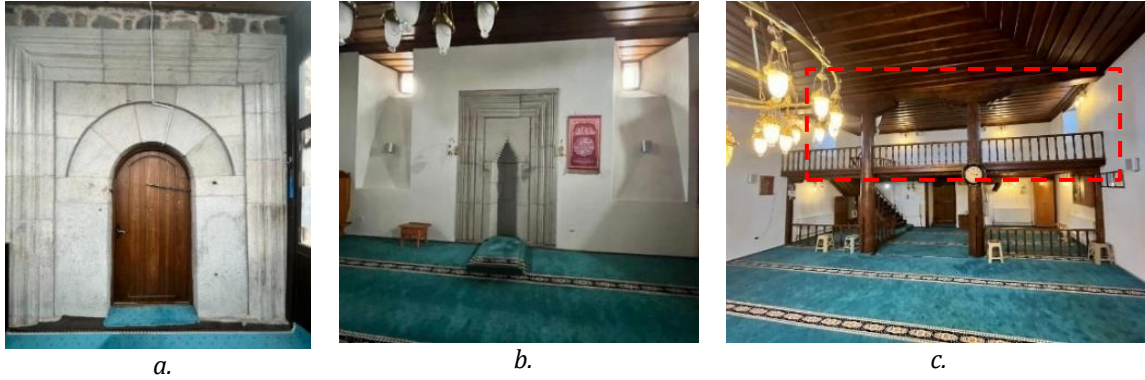
Camide harimin güneybatı köşesinde yer alan mazgal pencerenin altında günümüzde bulunmayan panoda H. 1315 (M. 1897) tarihi yazılı ve bu tarihin caminin geçirdiği bir onarıma ait olduğu düşünülmektedir [41]. Müderrisoğlu İbrahim Efendi Camii malzeme ve teknik açısından Mevlüt Efendi Camii'ne benzemektedir. Cephelerinde bölgeye özgü volkanik bir taş olan kırmızı ignimbrit* ve bazalt kaba yonu taşlarla kısmen düzenli bir biçimde örülmüş, köşe noktalarında kesme taş kullanılmıştır (Şekil 13). Caminin güney ve batı cephelerinde üç (Şekil 13-a, b), doğu cephesinde (Tablo 2) iki adet mazgal pencere (içe doğru açılan) yer almaktadır. Batı cephesi alt sıradaki taş dizilimiyle üst bölüm arasında farklılıklar yer almakta bu durum yapının daha önce geçirdiği onarımları göstermektedir (Şekil 13-a).



Şekil 13. Müderris İbrahim Efendi Camii batı cephesi (a), güney cephesi (b)

Caminin mihrap nişinin ana kapı ile malzeme ve teknik bakımından benzer olmaları, mihrap nişinin ilk halindeki gibi olduğunu göstermektedir (Şekil 14-a, b). 2017 yılında geçirdiği restorasyonla, yıkılmış olan kadınlar mahfili yeniden yapılmıştır (Şekil 14-c). Harim duvarlarında yer alan kalem işi süslemelerin de bu restorasyonla yapılan sıva uygulaması sonrası kaybolduğu söylenmektedir (Şekil 14-c) [8].

* Gri ve kırmızı tonlarda yüzey altı ocaklardan çıkarılan, kolay işlenen ve gözenekli bir dokuda, Bknz. [31]


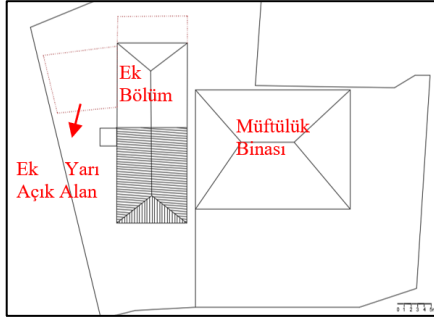
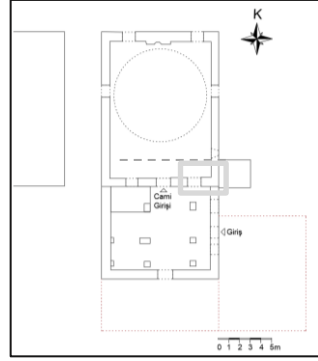


Şekil 14. Ardahan Müderris İbrahim Efendi Camii ana kapısı (a), güney duvar mihrap nişi görünüşü (b), kuzey duvar kadınlar mahfili görünüşü (c)

4.3. Ardahan Derviş Bey Camii (1868)

Ardahan Derviş Bey Camii (1868), Mevlüt Efendi ve Müderrisoğlu İbrahim Efendi camileri gibi Halil Efendi Mahallesi'nde, Ardahan Kalesi'nin güney surlarına yaklaşık 200 m. uzaklıkta, Kura Nehri'nin 130 m. güneyinde yer almaktadır (Şekil 6). Günümüzde Ardahan Merkez Camii (1970) ile karıştırıldığı için birçok yerde yanlış bilgiler barındırılmaktadır. Örneğin cami, Google Earth üzerinde bile isimlendirilmemiş; Derviş Bey Camii olarak Ardahan Merkez Camii gösterilmiştir. Caminin doğu cephesi, bahçesinde yer alan Ardahan Müftülüğü binasına yaklaşık 1.00/1.50 m. mesafede bulunmaktadır. Bu durum caminin doğu cephesinin kısmen kapatılarak bütünüyle görünmesine engel olmuştur. Caminin dış avlusunun bir bölümü üst örtüyle yarı açık, diğer bölümü de tamamen olmak üzere sonradan kapatılmış ve kapatılan bölüme rüzgârlık eklenmiştir (Şekil 15). Dikdörtgen, doğu-batı yönlü gelişim gösteren plan şemasına sahip Derviş Bey Camii üst örtüsü oluklu sac trapez kaplama basit kırma çatılıdır (Tablo 4). Müderrisoğlu İbrahim Efendi Camii'nde de olduğu gibi kuzey cephesine sonradan eklenen alan, cephenin dışarıdan görülmesini engellemektedir (Şekil 15, 16-b). Günümüzde bu cephe bir iç duvar niteliğinde karşımıza çıkmaktadır. Caminin kuzey cephesinde, giriş kapısının sol üst köşesinde yer alan kitabede H. 1285 (1868) tarihi bulunmakta ve caminin inşa tarihi olduğu düşünülmektedir (Şekil 15).

Tablo 4. Ardahan Derviş Bey Camii ([27]'den uyarlanmıştır)

Derviş Bey Camii		
		
Yapım Yılı: 1886	a. Vaziyet planı	b. Plan

Caminin sonradan duvar örülerek kapatılmış dış avlusuna batı cephesindeki, üst örtüsü oluklu sac olup yarı açık alanda yer alan rüzgârlıktan girilerek (Şekil 16-b); yaklaşık 10 m. kuzeyindeki ana kapıdan ulaşılmaktadır (Şekil 15). Cami hariminin sol tarafındaki ahşap merdivenle kadınlar mahfiline ulaşım sağlanmaktadır (Şekil 17). Harim girişinin hemen sağında ise çevresi korkulukla kapatılarak tanımlanmış bir alan bulunmaktadır (Şekil 18-b).



Şekil 15. Derviş Bey Camii kuzey cephesi kitabe görünüşü

Caminin cephe köşelerinde bazalt kaba yonu kesme taş kullanılırken orta kısımda kırmızı ve gri ignimbritler kullanılmıştır (Şekil 16-a). Caminin güney cephesinde iki alt sırada iki üst sırada olmak üzere dört adet, bazalt söveli çift cidarlı pencere yer almaktadır (Tablo 3, Şekil 16-a). Alttaki pencerelerin tüm kenarlarında söve bulunurken üstteki pencerelerin sadece üst bölümünde söve olması alt pencere açıklıklarının orijinal olduğunu düşündürmektedir (Tablo 3). Yapının doğu ve batı cephelerinde dikdörtgen pencere ve birer mazgal pencere yer almaktadır (Şekil 1, Şekil 17). Caminin batı cephesinde kare bir kaide üzerinde, silindirik gövdeli, düzgün kesme taş malzemeli, tek şerefeli bir minare bulunmaktadır (Şekil 16-a).



Şekil 16. Ardahan Derviş Bey Camii güney cephesi (a), kuzeybatı cephesi (b), güneybatı cephesi (c)



Şekil 17. Derviş Bey Camii batı (a) ve doğu (b) kadınlar mahfilisi mazgal pencere görünüşü

Caminin kubbesinin ilk hali ahşap olup sonradan bir sıra ahşap bir sıra beyaz renge boyanmıştır (Şekil 18-a). Caminin harim girişinin üzerinde yer alan kadınlar mahfilisine, girişin doğusunda yer alan ahşap kaplama merdivenle ulaşım sağlanmakta ve yapı içinde yer alan dört sütun, kadınlar mahfilisi için taşıyıcılık yapmaktadır (Şekil 18-b).



Şekil 18. Ardahan Derviş Bey Camii Camii içi genel görünüşü (a), kuzey cephesi iç duvar görünüşü (b) doğu cephesi (c) iç duvar görünüşü

Derviş Bey Camii giriş kapısı taş kemerli olup Mevlüt Efendi ve Müderrisoğlu İbrahim Efendi Camii'nde olduğu gibi dikdörtgen silmelerle çevrilmiştir (Şekil 19). Caminin giriş kapısı kemerinin sağ ve sol üst köşelerinde iki adet kitabe yer almaktadır, sağda "La şerefe a'la mine'l- İslam" (İslam'dan daha şerefli bir şey yoktur.); solda ise "Hüvel hallakü'l-baki" (Baki olan Allah'tır.) yazmaktadır (Şekil 19).



Şekil 19. Ardahan Derviş Bey Camii ana kapısı ve kitabeleri

5. Bulgular

Osmanlı son dönem yapılarından Mevlüt Efendi Camii (1701), Müderrisoğlu İbrahim Efendi Camii (1771) ve Derviş Bey Camii (1868) belirlenen ekolojik mimarlık tasarım ölçütleri yönünde ele alınmıştır. Yapıların konum özellikleri (yönlenme, iklim ve topoğrafyaya uygunluk, çevresel ilişkiler, hakim rüzgâr), plan özellikleri (form, boyut), malzeme kullanımı, yapım tekniği (açıklıklar, yapım sistemleri, kaynak kullanımı) ve yapı kullanım özellikleri incelenerek mekânsal ve çevresel verilerin izleri araştırılmıştır (Tablo 5).

Tablo 5. Mevlüt Efendi Camii (1701), Müderris İ. Efendi Camii (1771) ve Derviş Bey Camii (1868) mekân ve çevresel özellikleri

	Mevlüt Efendi Camii (1701)	Müderris İ. Efendi Camii (1771)	Derviş Bey Camii (1868)		
Plan Tipi	Kareye yakın dikdörtgen	Kareye yakın dikdörtgen	Dikdörtgen		
Kat Adedi	2 (Zemin+ Asma Kat)	2 (Zemin+ Asma Kat)	2 (Zemin+ Asma Kat)		
En	14,5 m	9,20 m	12 m		
Boy	17 m	11,24 m	16,5 m		
Alan	245 m ²	103,408 m ²	198 m ² (özgün bölüm)		
Duvar Kalınlığı	100 cm	70 cm	80 cm		
Yapı Malzemesi	Duvar	Düzgün Bazalt Kesme Taş, İgnimbrit	Düzgün Bazalt Kesme Taş, İgnimbrit	Düzgün Bazalt Kesme Taş, İgnimbrit	
	Zemin	Sonradan kaplama halı	Sonradan kaplama halı	Sonradan kaplama halı	
	Çatı	Oluklu Sac Kaplamalı Kıрма Çatı	Oluklu Sac Kaplamalı Kıрма Çatı	Oluklu Sac Kaplamalı Kıрма Çatı	
	Kapı	Dikdörtgen Silmeli Ahşap	Dikdörtgen Silmeli Ahşap	Dikdörtgen Silmeli Ahşap	
	Pencere	Malzeme	PVC (değiştirilmiş orijinal malzeme ahşap)	PVC (değiştirilmiş orijinal malzeme ahşap)	PVC (değiştirilmiş orijinal malzeme ahşap)
		Güney	3 Adet Üst/ 2 Adet Alt pencere (Çift cidarlı)	2 Adet Üst Mazgal Pencere	2 Adet Alt Pencere (Çift Cidar) / 2 Adet Üst Mazgal Pencere
		Kuzey	Yok	Yok	1Adet Alt Pencere (Çift cidarlı)
		Doğu	1 Adet Pencere (Çift cidarlı)	3 Adet Üst Mazgal Pencere	1Adet Alt Pencere (Çift cidarlı)
		Batı	1 Adet Pencere (Çift cidarlı)	3 Adet Üst Mazgal Pencere	1Adet Alt Pencere (Çift cidarlı) / 1 Adet Mazgal Pencere
	Rüzgârlık	Sonradan Eklenmiş	Sonradan Eklenmiş	Sonradan Eklenmiş	
Isıtma Sistemi	Doğal gaz	Doğal gaz	Doğal gaz		
Ağaçlandırma Çalışması	Caminin güneyinde henüz küçük üç çam ağacı bulunmaktadır	Yok	Caminin güneybatısında bir tane çam ağacı bulunmaktadır		
Yakın çevrede yerleşim	Var (2 katlı lojman-abdesthane)	Var (Konut)	Var (batısında 3 katlı müftülük binası, doğusunda askeri tesis)		
Arazi ekolojik değeri	Düşük	Düşük	Düşük		
Erişilebilirlik	Uygun (yaz)	Uygun (yaz)	Uygun (Yaz-kış)		
Ulaşım	Yaya yolu-Toplu taşıma var	Yaya yolu-Toplu taşıma var	Yaya yolu-Toplu taşıma var		
Bahçe	Var (Lojman ve abdesthane ortak kullanımında)	Var	Var (Müftülük, Kur'an Kursu ve Camiye ait.)		
Yalıtım	Bilinmiyor	Bilinmiyor	Bilinmiyor		
Yeniden Kullanım	Evet	Hayır	Hayır		

Doğal çevreye duyarlı, topografik veriler ve iklimsel şartların dikkate alınarak uyumlu tasarımların yapılması yönüyle; Yapıların ilk olarak konum özellikleri incelenerek topografyaya olan yerleşimleri analiz edilmiştir. Ardahan sert karasal iklim bölgesi olup aynı zamanda dağlık ve engebeli yapısının getirmiş olduğu mikroklimatik ve iklimsel farklılıkları açısından dikkat çekicidir. Bu sebeple binaların rüzgârdan ve iklimin getirdiği ayaz havasından korunmak için alçak, korunaklı alanlara inşa edilmesi ve hakim rüzgâr yönündeki (WNW (batı-kuzeybatı), WSW (batı-güney batı) ve SSE (güney-güneydoğu)) açıklıkların minimumda tutulması gerekmektedir. Bu yönüyle Mevlüt Efendi Camii ve Derviş Bey Camii'nin çevre yapılaşmalardan ötürü rüzgâra karşı korunaklı alanlarda olduklarını söylemek mümkünken (Tablo 6, 8) Müderris İbrahim Efendi Camii'nin konumunun rüzgâr faktörüne açık olduğu görülmektedir (Tablo 7). Mevlüt Efendi ve Müderris İbrahim Efendi Camii'nin bulunduğu alanlar az eğimli arazilerken (Tablo 6, 7) Derviş Bey Camii onlara göre daha eğimli bir alanda olup altının doldurulduğu düşünülmekte bunun yanı sıra rakım olarak diğerlerine göre alçakta olduğunu söylemek mümkündür (Tablo 8). Buna ek olarak cami yapılarında yönlenme kibleye göre yapıldığı için her üç caminin de arazideki yönlenme biçimleri güney yönlüdür. Yapıların yer aldığı arazilerin, doğal yaşam alanları, ekosistem hizmetleri, su kaynakları, biyoçeşitlilik ve toprak kalitesi gibi faktörlerin göz önünde bulundurulması sonucu ekolojik değerlerinin düşük olduğunu söylemek mümkündür. Yapı yakın çevreleri incelendiğinde her üç caminin de bahçesi olduğuna ulaşılmakta ve bahçede bulunan peyzaj öğelerinin yağmur suyu dışında ekstra bir sulama gerektirmediği görülmektedir. Buna ek olarak yapıların yakın çevrelerinde ağaçlandırma çalışmaları

gözlemlenmiş Mevlüt Efendi Camii'nin güneyinde ve Derviş Bey Camii'nin güneybatısında ağaçlandırmalar bulunduğu görülmüştür (Tablo 6, 8). Ancak ağaçların henüz küçük ve seyrek olmaları yapıya karşı herhangi bir koruma sağlama durumunu sağlamamaktadır.

Arazi yerleşimi ve yakın çevreleri incelendikten sonra plan şemaları irdelenen camilerin üçü de dikdörtgen, güney kuzey yönlü gelişim gösteren plan şemasına sahip olup orijinalinde girişleri doğrudan dışarıdan almaktadır. Ancak zaman içerisinde bölgenin soğuk iklimsel şartları gereğince yapılara sonradan rüzgârlık eklenmiştir. Bu yönüyle iç ve dış mekân arasındaki ısı kayıpları önlenmeye çalışılmıştır (Tablo 6, 7, 8).

Daha sonra yapıların cephe özellikleri incelenerek yapı üzerindeki çevresel verilerin izleri analiz edilmiştir. Bu bakımdan ilk olarak yapıların üst örtüleri incelenmiş ve günümüzde üç yapının da üst örtüsünün oluklu sac trapez levha kaplamalı kırma çatı olduğuna ulaşılmıştır. Bu durumun sebebi iklim özelliklerinin getirdiği yaz-kış yağış alma durumu, kışın kalıcı kar süresinin ve kar yağışı miktarının fazla olmasıdır. Mevlüt Efendi Camii'nin orijinal halinde toprak dam olduğuna ulaşılmıştır (Tablo 6). Yapının su alması ve malzeme bozulmaları sebebiyle onarım sonrası çatısının değiştirildiği düşünülmektedir.

Bunun yanı sıra bina tasarımı ölçeğinde enerji kazanımları ve pasif sistemler için cephesel özellikler incelenmiştir. Camilerin üçünün de güney cephesinde yer alan pencere sayıları diğer cephelere oranla daha fazla olup bu durumun sebebinin gün ışığından doğrudan fayda sağlanması olduğu düşünülmektedir. Ardahan Mevlüt Efendi ve Derviş Bey Camii'nde yer alan çift cidarlı pencere sistemiyle, cami cephelerinde tampon duvar ve ısı odaları oluşturulması sağlanarak pasif güneş sistemlerinden faydalanılmıştır (Tablo 6, 8). Pencere sistemi yönüyle farklı yapıda olan Müderrisoğlu İbrahim Efendi Camii'nde ise içe doğru açılan mazgal pencereler ile dışarıdan küçük yüzey alanıyla alınan ışığın içeride daha geniş bir alana nüfuz etmesi sağlanmaktadır (Tablo 7). Bunun yanı sıra mazgal pencerelerin dış cephede yüzeyi daha az olduğu için pencere etrafı oluşabilecek ısı geçişleri en düşük oranda tutulmuştur. Ancak diğer iki camiye kıyasla Müderrisoğlu İbrahim Efendi Camii'nin gün ışığını daha az aldığı ve görsel konforun sağlanmadığını söylemek mümkündür (Tablo 7). Bu durumun sebeplerine caminin güney cephesinde yapılaşmaların olması sebebiyle gün ışığından yeterince faydalanamaması gösterilebilir.

Seçilen camilerde daha sonra yapı malzemeleri incelenmiştir. Bu bakımdan incelenen üç camide de bölgeden çıkarılmakta olan düzgün bazalt kesme taş ile kırmızı-gri ignimbrit taş görülmesi yerel malzeme kullanıldığı için nakliyede ve dolayısıyla fiziksel olarak minimum enerji kullanıldığı için iş gücü ile ekonomik açıdan fayda sağlandığını göstermektedir. Bunun yanı sıra kullanılan taş malzeme geri dönüştürülebilir, dayanıklı ve bölgeyle uyumlu olup kullanıcıya kışları sıcak yazları serin bir ortam sunmaktadır. Bunun yanı sıra kapı silmelerinde kullanılan dikdörtgen bazalt kesme taşlar da bölgeden çıkarılmaktadır. Bunun yanı sıra yapı beden duvarlarının kalınlığı yalıtım ve dayanıklılık için olumlu bulunup sandık duvar sistemi kullanıldığı düşünülmektedir (Tablo 6, 7, 8).

Kullanıcı konforu yönüyle; Camilerin formları birbirlerine benzerken boyut olarak Derviş Bey Camii'nin kentteki Merkez Camii'ne olan mesafesinden ötürü kullanıcı gereksiniminden daha büyük alana sahip olduğunu söylemek mümkündür. Buna ek olarak; yapı iç mekânlarında bulunan süslemelere bakıldığında birbirinden farklı süslemelerle ön planda oldukları görülmektedir. Derviş Bey Camii tavanda yer alan kubbe görüntüsü sebebiyle, seçilen diğer camiler arasında en gösterişli olanıdır. Bunun yanı sıra Mevlüt Efendi Camii'nde mihrabın yer aldığı duvarın çinilerle kaplanması ve Mevlüt Efendi Camii ile Derviş Bey Camii'nin zemininden yükselen ahşap lambri kaplamalar da verilebilecek süsleme örnekleridir. Yapıların iç mekânlarında bulunan ahşap lambri kaplamalar; aynı zamanda karasal iklimin yol açtığı soğuk havanın duvara yakın kısımlarda oluşturduğu sıcaklık farkını azaltmak amacıyla kullanılmakta olup Müderrisoğlu İbrahim Efendi Camii'nde bulunmamaktadır. Her üç camide de duvarlara yapılan hat sanatı minimum seviyede tutulmuştur. Bu durumun iş gücü ve maliyeti olumlu yönde etkilediği düşünülmektedir.

Camiler diğer kamu yapılarının aksine mahallelere hitap etmektedir. Bu sebeple ulaşımın da mahalle bazında düşünülmesi gerekip her üç caminin de bu yönüyle yaya ulaşımını sağladığı düşünülmektedir. Buna ek olarak toplu taşıma yöntemiyle ulaşım sağlanabilmektedir (Tablo 6,7, 8). Kent merkezi bazında irdelendiğinde ana ulaşım aksı yönüyle Derviş Bey Camii dışındaki diğer iki cami de kamusal mekânlara ve merkeze uzak mesafelerde yer almaktadır (Tablo 6, 7, 8).

Son olarak yeniden kullanım yönünden değerlendirilen yapılardan Mevlüt Efendi Camii'nin öncesinde kilise olup günümüzde cami olarak işlevlendirildiğine ulaşılmıştır. Bu yönüyle de Mevlüt Efendi Camii'nin sürdürülebilir bir işlevde kullanıldığını söylemek mümkündür. Yapıların uzun süre ayakta kalmasında kullanılabilir durumda olmasının payı büyüktür. Ulaşılan bulgular sonucunda yapılar bir tablo üzerinde ekolojik mimari tasarım ölçütlerince değerlendirilmiştir (Tablo 6, 7, 8).

Tablo 6. Mevlüt Efendi Camii'nin Ekolojik Ölçütler Kapsamında Değerlendirilmesi

Arazi seçimi	Ekolojik değeri düşük ve açık kamusal alanlara yakın bir arazidedir.
Araziye yerleşim	Topografik yapıya uygun yerleşim sağlanmıştır. Yapı türünün gerektirdiği koşullar çerçevesinde yönlenme sağlanmıştır. Ancak yakın çevresindeki yapılaşma yapıya göre geliştirilmiş bu durum yapının güneşlenme seviyesini olumlu etkilemiştir. Kompakt gelişme desteklenmemektedir.
Ulaşım	Toplu taşıma ile ulaşım kolaylıkla sağlanmaktadır. Yerel olanaklara ve kentsel donatılara yakınlığı olumsuzdur. Yakın çevrede yayalar için kullanım alanları ve yaya yolları bulunmaktadır.
Yönetim	Yapının özgün işlevinin kilise olması ve günümüzde cami olarak tekrar işlevlendirilmiş olması olumludur. Yapıda ahşap ve taş gibi yeniden kullanılabilir ve hafriyatı kolay kaldırılabilir malzemeler bulunmaktadır.
Ekonomi ve maliyet	Yapım aşamasında malzemeler bölgesel özellikte olduğu için nakliye maliyeti minimumda tutulmuştur. Yapı malzemesinin sık onarım ve temizlik gerektirmemesi maliyet için olumlu bir faktördür. Yapının gündüz aydınlatması yeterli olduğu için gündüz aydınlatma kullanımına gerek kalmamaktadır. Yapının işlevinden ötürü kullanım sıklığı ve yoğunluğu ısıtma maliyetine olumsuz etkimektedir. Herhangi bir yıkım gerektirme durumunda yapı malzemeleri yerel başka bir yapıya entegre edilebileceğinden atık kaldırma maliyeti de minimumdadır. Yapı süslemeleri minimum seviyede tutulmuştur. Bu durumun iş gücü ve maliyeti olumlu yönde etkilediği düşünülmektedir.
Bina yakın çevre tasarımı ölçeğinde	Yapı konumlandırılma durumu güneş ışınımı bakımından uygundur ancak binanın hemen bitişiğindeki lojman, yapı bahçesinin kullanılabilirliğini ve görsel konforunu olumsuz etkilemektedir. Yapı aralığı ve konumlandırılma durumu yapı yakın çevresinin rüzgâr hareketini engellemesi bakımından uygun ancak ortalama yağış bakımından yapı girişinin kuzeyde kalması ve kar yağışı olduğunda erimesinin zor olması bakımından uygun değildir. Bahçe düzenlemesinde yer alan bitkilerin ekstra sulama gerektirmemesi olumludur.
Bina tasarımı ölçeğinde	Çatıların %33 eğimli olması ve oluklu sac trapez kullanımı bölgenin iklimsel koşullarına uygundur. Bina cephesinde yer alan pencere açıklıklarındaki pencere yüzey alanının geniş olması güneş ışınımını olumlu etkilemektedir.
Bina kabuğu tasarımı ölçeğinde	Yapı dış duvarının 1 m civarında olması yapıda sandık duvar sisteminin kullanılmış olma olasılığını göstermekte dolayısıyla yalıtımın sağlandığını söylemek mümkündür. Yapıda çift cam kullanımı ısı geçişinin engellenmesinde önemli rol oynamaktadır.
Malzeme seçimi ve kullanımında	Yapının gerek duvarları gerekse de kapısında kullanılan taş malzeme kısın sıcak yazın serinlik sağlamaktadır. Kapısındaki ahşap malzemeyle beraber doğaya uyumlu ve dayanıklı malzemeler kullanıldığını söylemek mümkündür.
Görsel konfor	Mekân uygun bir şekilde gün ışığından yararlanmaktadır. Dışarı ile görsel iletişim kalitesi olumludur.
İç hava kalitesi	Kirletici yaymayan ahşap lambri malzeme kullanılması ve mekânın doğal yollarla havalandırılması (pencerelerin karşılıklı açılmasıyla hava akımı sağlanması) olumludur.
Erişilebilirlik	Bina girişi engelli erişimine uygun tasarlanmamıştır.
Mekân ve çevre kalitesi	Yapının kullanıcılarına ait bahçesi bulunmakta ancak yakın çevrede yer alan lojman yapısı bahçeyi oldukça küçültmektedir. Yapı çevresinde rekreasyon alanları bulunmamaktadır. Yapı 2. Derece deprem riski olan bölgede yer almakta ancak kentteki fay hattı yapının yakınından geçmemektedir. Yapı özgün işleviyle kullanılmaya devam ettiği için kullanım uygundur. Mekânın camiye dönüştürülmesiyle eklenen kadınlar mahfili ve kapatılan kiliseye ait bölmeler yapıda esnek kullanım olduğunu göstermektedir.
Doğrudan kazanç	Saydam yüzeyler; Pencere açıklıklarıyla sağlanmaktadır.
Dolaylı kazanç	Bina cephesinde yer alan pencere açıklıklarındaki çift cidarlı pencere sistemlerinin kullanılması yapının hem soğuk iklim şartlarından hem şiddetli rüzgârlardan korumakta hem de ısı kaybının minimuma indirilmesini sağlamaktadır.
Ekolojik kriterleri	
Sağlıyor	Sağlamıyor

Mevlüt Efendi Camii fiziksel ve çevresel özelliklerinin incelenmesi sonucunda; caminin yer seçiminin ekolojik mimariye uygun olduğu ve topoğrafyayla uyumlu yerleşim gösterdiğine ulaşılmaktadır. Yapıya toplu taşıma ile ulaşımın sağlanması ve yaya yollarının desteklenmesi doğaya saygılı bir yaklaşım sergilendiğini göstermektedir. Yapıda kullanılan malzemelerin yerel, dönüştürülebilir ve dayanıklı malzemelerden seçilmiş olması; nakliye maliyeti, toplam maliyet, iş gücü ve hareketi minimize ederken malzemede sürdürülebilirliği sağlamakta ve

yapının kullanım ömrünü uzatmaktadır. Yapıda kullanılan pencere açıklıkları yapının aydınlatma ve ısıtma sisteminde etkin rol almaktadır. Bunun yanı sıra yapının yeniden işlevlendirme sonrası günümüzdeki işlevine kavuşmuş olması ekolojik mimari tasarıma örnek ölçütlerdendir. Yapı yakın çevresi incelendiğinde ise yapının yerleşim planına müdahale edilerek bitişine bina inşa edildiği ve bu durumun yapının topografik yerleşimine olumsuz etkilediği görülmektedir. Son olarak yapı erişilebilirliği incelendiğinde yapı girişlerinin ortopedik engelliler için kış mevsimi hariç uygun olduğuna ancak görme engelliler için yaya geçidi/sarı geçit gibi tanımlayıcı bir işaretin bulunmadığı görülmektedir.

Tablo 7. Müderris İbrahim Efendi Camii'nin Ekolojik Ölçütler Kapsamında Değerlendirilmesi

Arazi seçimi	Ekolojik değeri düşük ve açık kamusal alanlara yakın bir arazidedir.
Araziye yerleşim	Topografik yapıya uygun yerleşim sağlanmıştır. Yapı türünün gerektirdiği koşullar çerçevesinde yönlenme sağlanmıştır. Ancak yakın çevresinde güneyindeki yapılaşma yapının güneşlenme seviyesini olumsuz etkilemiştir. Kompakt gelişme desteklenmemektedir.
Ulaşım	Toplu taşıma ile ulaşım kolaylıkla sağlanmaktadır. Yerel olanaklara ve kentsel donatılara yakınlığı olumsuzdur. Yakın çevrede yayalar için kullanım alanları ve yaya yolları bulunmaktadır.
Yönetim	Yapının işlevinin günümüzde halen devam etmesi ve kullanılabilir olması olumludur. Yapıda ahşap ve taş gibi yeniden kullanılabilir ve hafriyatı kolay kaldırılabilir malzemeler bulunmaktadır.
Ekonomi ve maliyet	Yapım aşamasında malzemeler bölgesel özellikte olduğu için nakliye maliyeti minimumda tutulmuştur. Yapı malzemesinin sık onarım ve temizlik gerektirmemesi maliyet için olumlu bir faktördür. Yapının gündüz aydınlatması yeterli olmadığı için gündüz aydınlatma kullanımına gerek duyulmaktadır. Yapının işlevinden ötürü kullanım sıklığı ve yoğunluğu buna ek olarak gündüz güneş ışınımından az fayda sağlaması ısıtma maliyetine olumsuz etkilemektedir. Herhangi bir yıkım gerektirme durumunda yapı malzemeleri yerel başka bir yapıya entegre edilebileceğinden atık kaldırma maliyeti de minimumdadır. Yapı süslemeleri minimum seviyede tutulmuştur. Bu durumun iş gücü ve maliyeti olumlu yönde etkilediği düşünülmektedir.
Bina yakın çevre tasarımı ölçeğinde	Yapı konumlandırılma durumu güneş ışınımı bakımından uygundur ancak binanın güneyinde yer alan yapı, caminin görsel konforunu olumsuz etkilemektedir. Yapı yakın çevresindeki yapılaşmanın az olması rüzgâr hareketinin engellenmesi bakımından uygun değildir. Bahçe düzenlemesinde yer alan bitkilerin ekstra sulama gerektirmemesi olumludur.
Bina tasarımı ölçeğinde	Çatıların %33 eğimli olması ve oluklu sac trapez kullanımı bölgenin iklimsel koşullarına uygundur. Bina cephesinde yer alan pencere açıklıklarındaki pencere yüzey alanının dışarı dönük dar olması güneş ışınımını olumsuz etkilerken rüzgâr ve soğuk kış koşulları için uygulanabiliridir.
Bina kabuğu tasarımı ölçeğinde	Yapı dış duvarının 70 m civarında olması yapıda sandık duvar sisteminin kullanılmış olma olasılığını göstermekte dolayısıyla yalıtımın sağlandığını söylemek mümkündür. Yapıda çift cam kullanımı ısı geçişinin engellenmesinde önemli rol oynamaktadır.
Malzeme seçimi ve kullanımında	Yapının gerek duvarları gerekse de kapısında kullanılan taş malzeme kışın sıcak yazın serinlik sağlamaktadır. Kapısındaki ahşap malzemeyle beraber doğaya uyumlu ve dayanıklı malzemeler kullanıldığını söylemek mümkündür.
Görsel konfor	Mekân uygun bir şekilde gün ışığından faydalanamamaktadır. Dışarı ile görsel iletişim kalitesi olumsuzdur.
İç hava kalitesi	Kirlenici yaymayan ahşap korkulukların kullanılması olumlu ancak ahşabın uzun ömürlü olması için boya ve cila kullanılması iç hava kalitesi için uygun değildir. Mekân havalandırması konusunda yapının yetersiz olduğu düşünülmektedir. Üst katta yer alan iki pencerenin karşılıklı açılmasıyla havalandırma sağlanmaktadır.
Erişilebilirlik	Bina girişi engelli erişimine uygun şekilde tasarlanmamıştır.
Mekân ve çevre kalitesi	Yapının kullanıcılarına ait bahçesi bulunmaktadır. Yapı çevresinde rekreasyon alanları bulunmamaktadır. Yapı 2. Derece deprem riski olan bölgede yer almakta ancak kentteki fay hattı yapının yakınından geçmemektedir. Yapı özgün işleviyle kullanılmaya devam ettiği için kullanım uygundur.
Doğrudan kazanç	Saydam yüzeyler; Pencere açıklıklarıyla sağlanmaktadır.
Dolaylı kazanç	Sağlanmamaktadır.
Ekolojik kriterleri	
Sağlıyor	Sağlamıyor

Müderri İbrahim Efendi Camii fiziksel ve çevresel özelliklerinin incelenmesi sonucunda; caminin yer seçiminin ekolojik mimariye uygun olduğuna ulaşılmaktadır. Yapıya toplu taşıma ile ulaşımın sağlanması ve yaya yollarının desteklenmesi doğaya saygılı bir yaklaşım sergilendiğini göstermektedir. Yapıda kullanılan malzemelerin yerel, dönüştürülebilir ve dayanıklı malzemelerden seçilmiş olması; Mevlüt Efendi Camii de olduğu gibi maliyet ve iş gücünü azaltmakta malzemelerin yeniden kullanımını sağlayarak ekolojik mimariye fayda sağlamaktadır. Ancak bunun yanı sıra yapının yakın çevresinde yer alan yapılaşmalar ve cephedeki pencere açıklıklarının boyutundan ötürü yapıda ortaya çıkan aydınlatma ve ısıtma gereksinimi ekolojik mimariyi olumsuz etkilemektedir. Buna ek olarak yapı girişlerinin engelliler için erişilebilir olmadığı düşünülmektedir.

Tablo 8. Derviş Bey Camii'nin Ekolojik Ölçütler Kapsamında Değerlendirilmesi

Arazi seçimi	Ekolojik değeri düşük ve açık kamusal alanlara yakın bir arazidedir.
Araziye yerleşim	Topografik yapıya uygun yerleşim sağlanmıştır. Yapı türünün gerektirdiği koşullar çerçevesinde yönlenme sağlanmıştır. Yapının ek bölümleri yapı bütünlüğünü bozacak biçimde kompakt gelişmeye izin vermektedir. Ancak yapının güney cephesinin açık olması güneşe yönlenme konusunda olumlu etkimiştir.
Ulaşım	Toplu taşıma ile ulaşım kolaylıkla sağlanmaktadır. Yerel olanaklara ve kentsel donatılara yakınlığı uygundur.
Yönetim	Yapıya sonradan eklenen bölümün sadece cuma günleri, bayram ve teravih gibi özel günlerde dolması yapı eklemlerinin uygun olmadığını göstermektedir. Bu eklemeler görsel açıdan da uygun değildir. Yapıda ahşap ve taş gibi yeniden kullanılabilir ve hafriyatı kolay kaldırılabilir malzemeler kullanılırken ek bölüm betonarmedir.
Ekonomi ve maliyet	Yapım aşamasında malzemeler bölgesel özellikte olduğu için nakliye maliyeti minimumda tutulmuştur. Yapı malzemesinin sık onarım ve temizlik gerektirmemesi maliyet için olumlu bir faktördür. Yapının gündüz aydınlatması yeterli olduğu için aydınlatma masrafı minimumdur. Yapının işlevinden ötürü kullanım sıklığı ve yoğunluğu buna ek olarak gündüz güneş ışınımından az fayda sağlama ısıtma maliyetine olumsuz etkinken ek bölümün yapıya büyükçe bir rüzgârlık işlevi görmesi bu maliyette azalmalara sebep olmaktadır. Yapı süslemeleri minimum seviyede tutulmuştur. Bu durumun iş gücü ve maliyeti olumlu yönde etkilediği düşünülmektedir.
Bina yakın çevre tasarımı ölçeğinde	Yapı konumlandırılma durumu güneş ışınımı bakımından uygundur. Bahçe düzenlemesinde yer alan bitkilerin ekstra sulama gerektirmemesi olumludur.
Bina tasarımı ölçeğinde	Çatıların %33 eğimi ve oluklu sac trapez malzeme kullanımı iklimsel koşullara uygundur. Bina cephesinde yer alan pencere açıklıklarındaki pencere yüzey alanının geniş olması güneş ışınımını olumlu etkilemektedir.
Bina kabuğu tasarımı ölçeğinde	Yapı dış duvarının 80 m civarında olması yapıda sandık duvar sisteminin kullanılmış olma olasılığını göstermekte dolayısıyla yalıtımın sağlandığını söylemek mümkündür. Yapıda çift cam kullanımı ısı geçişinin engellenmesinde önemli rol oynamaktadır.
Malzeme seçimi ve kullanımında	Yapının kullanılan taş malzeme kışın sıcak yazın serinlik sağlamaktadır. Kapısındaki ahşap malzemeye beraber doğaya uyumlu ve dayanıklı malzemeler kullanıldığını söylemek mümkündür. Ancak ek bölümde kullanılan malzemelerle özgün malzemeler arasındaki uyumsuzlukların iklimsel koşullar etkisiyle zamanla çatlama, gözeneklenme ve taş kaybı gibi sorunlara yol açması muhtemeldir. Bunun yanı sıra yapının avlusunun üst örtüsü olan sac trapez levha ve metal profil kullanımı yeniden kullanımlara entegre edilebilirliği bakımından olumludur.
Görsel konfor	Mekân uygun bir şekilde gün ışığından faydalanmaktadır. Dışarı ile görsel iletişim kalitesi olumludur.
İç hava kalitesi	Yapının kadınlar mahfilinde geri dönüştürülebilir ve duvarın yalıtılmasında kullanılan ahşap lambri kaplamalar bulunmakta ve bu malzeme ortama kirletici hava yaymamakla beraber duvarın neminin iç ortamdaki hissedilmesini engellemektedir. Mekânın doğal yollarla havalandırılması (pencerelerin karşılıklı açılmasıyla hava akımı sağlanması olumludur.
Erişilebilirlik	Bina girişi yaz-kış engelli erişimine uygun şekilde tasarlanmamıştır.
Mekân ve çevre kalitesi	Yapının kullanıcılarına ait bahçesi ve avlusu bulunmaktadır. Yapı çevresinde rekreasyon alanları bulunmaktadır. Yapı 2. Derece deprem riski olan bölgede yer almaktadır ve diğer iki yapıya göre fay hattına daha yakındır. Yapı özgün işleviyle kullanılmaya devam ettiği için kullanım uygundur.
Doğrudan kazanç	Saydam yüzeyler; Pencere açıklıklarıyla sağlanmaktadır.
Dolaylı kazanç	Bina cephesinde yer alan pencere açıklıklarındaki çift cidarlı pencere sistemlerinin kullanılması yapının hem soğuk iklim şartlarından hem şiddetli rüzgârlardan korumakta hem de ısı kaybının minimuma indirilmesini sağlamaktadır.
Ekolojik kriterleri	
Sağlıyor	Sağlamıyor

Derviş Bey Camii fiziksel ve çevresel özelliklerinin incelenmesi sonucunda; caminin yer seçiminin ekolojik mimariye uygun olduğuna ulaşılmaktadır. Yapıya toplu taşıma ile ulaşımın sağlanması ve kentsel donatılara yakın olması, yer seçimi ve yerleşim konusunda doğru yaklaşım sergilendiğini göstermektedir. Yapıda kullanılan malzemelerin yerel, dönüştürülebilir ve dayanıklı malzemelerden seçilmiş olması; diğer iki camide olduğu gibi maliyet ve iş gücünü azaltmakta malzemelerin yeniden kullanımını sağlayarak ekolojik mimariye fayda sağlamaktadır. Ancak bunun yanı sıra yapının sonradan deforme edilerek kuzey duvarının kısmen tahrip edilmiş olması ve etrafının ek bölümlerle sarmalanması sonucu hem maliyetten zarar edilmesine hem de kullanıcı profiline hitap edilmemesine sebep olunmuştur. Caminin yakın çevresinde yer alan bina, yapının güneşlenme seviyesini ve görsel konforunu azaltmaktadır.

4. Tartışma ve Sonuç

Günümüzde artan nüfus ve sanayileşmenin getirdiği plansız yapılaşma, bilinçsiz enerji tüketimini ve doğal kaynak israfını da beraberinde getirmiştir. Gün içerisinde etkileşimde olduğumuz pek çok alanda görülen bu tüketim artışının önemli örneklerinden birisi de eğitim, sağlık, ibadet gibi toplumsal ihtiyaçların karşılandığı kamu yapılarıdır. Bu yapılar arasında camiler boyut, mimari, kullanım şekli ve saatleri yönüyle diğerlerinden farklı olarak önemlidir. Camiler toplumun belirli bir kesimine hitap etmekte ve gün içerisinde diğer kamu yapılarının aksine belirli saatlerde yoğun olmak kaydıyla sürekli olarak kullanılmaktadır. Bu durum camilerde enerji kullanımının daha fazla olmasına neden olup cami tasarımı yapıldıkları yerin arazi verileri ve çevresel özellikleri değerlendirilerek bölgeye uyumlu, ekolojik tasarımlar yapılmasının önemli olduğunu söylemek mümkündür. Ancak günümüzde cami mimarisinde birbirleriyle benzer tip ve büyüklüklerde camilerin süregeldiği görülmektedir. Bu durum, toplum ihtiyacı ve yapılaşma arasındaki ilişkiyi olumsuz yönde etkilemektedir. Tarihi yapılar bu bakımdan günümüz mimarisine yol gösterici niteliğindedir. Bu sebeple tarihi camilerin enerji kullanımı açısından değerlendirilmeleri de önem arz etmektedir.

Çalışmada sert iklimi ve engebeli yapısıyla bilinen Ardahan ili kent merkezinden üç cami yapısı seçilmiştir. Günümüzde kitabelerine ulaşılabilen Müderrisoğlu İbrahim Efendi Camii 18. yüzyıl ve Derviş Bey Camii 19. yüzyıl yapısı olup kitabesinin sonradan yapılan ek bölümle kapatıldığı düşünülen Mevlüt Efendi Camii kaynaklara göre 18. yüzyıl yapısıdır. Camiler; yapım yılı, mimari tasarımı, konumu, çevresel verilerden yararlanma ölçütü, ekolojik yansımalar ve veri temini konularına dikkat edilerek seçilmiştir. Yapıların araştırılması sürecinde daha önceki bilimsel araştırmalar, yayınlanmış haberler ve alan çalışmaları kısas alınarak daha önceki kullanımları, mekân organizasyonları, geçirdiği restorasyon ve onarım süreçleri bilgilerine ulaşılmıştır. İncelenen yapıların; plan özellikleri, yapı malzemesi, yapım tekniği ve cephe düzeninden elde edilen veriler doğrultusunda üç cami üzerindeki ekolojik izler saptanarak öneriler getirilmiştir.

Çalışmada elde edilen veriler ışığında; Her üç caminin de çevresel veriler dikkate alınarak inşa edildiğini (arazi kotları); iklim şartlarına uyum sağlandığını (doğal aydınlatma ve ısıtma); geri dönüştürülebilir, ekonomik ve dayanıklı malzeme seçimi yapıldığını (bölgeden çıkarılan taş malzeme); iç ve dış cephe süslemelerinin (hat sanatı ve kalem işi süslemeler) asgari düzeyde tutularak iş gücü ve maliyeti olumlu yönde etkilediğini söylemek mümkündür.

Bunun yanı sıra yapıların cephe duvarlarının kalınlığıyla yalıtım sağlanması, pencerelerin içe doğru küçülmesi ile rüzgârın yüzeyi daha az etkilemesi ve güneş ışığının içeriye aydınlatmasının artırılması, yapı malzemelerinin taş ve ahşap gibi yerel, dayanıklı ve dönüştürülebilir malzemelerden seçilmesi durumlarını da özgün çevresel ve yapısal özelliklerinin ekolojik yaklaşımları sağlamasına örnek olarak göstermek mümkündür.

Yeni inşa edilecek/onarılacak camilerin yaşam döngüsü boyunca; ekoloji kriterlerinin sağlanması durumunda insan sağlığı ve konforu, aydınlatma-ısıtma problemleri, enerji tüketimi, ekonomi ve kaynak kullanımını olumlu yönde etkileyeceği açıktır. Belirli zaman aralıklarında yoğun kullanımlı olan ve gelecekte yapılması planlanan ya da mevcutta olup yeniden bakım onarımı gerçekleştirilen camilerde, ekolojik mimari kriterler de göz önünde bulundurularak çıkarılan, aşağıdaki önerilerin göz ardı edilmemesi önemlidir:

Bulunduğu şehir içerisinde kullanıcı yoğunluğu göz önüne alınarak yer seçiminin doğru yapılması ve yapıların arazi kotlarına yerleşiminde doğal kotlara uyumuna dikkat edilmesi gerekmektedir. Kentsel dokuya uyum sağlayan, kent yeşiline müdahale etmeyen bir yapı olması gerekmektedir. Yapının bulunduğu bölgenin iklim koşulları ve çevresel faktörleri dikkate alınmalıdır. Yapıların ana ulaşım aksına olan mesafesine dikkat edilmeli, toplu ulaşım akslarına erişimi rahat olmalı ve bunun yanı sıra yaya ulaşımını da destekleyecek yönde planlamalar yapılmalıdır. Temel prensipler içerisinde planlanacak camilerin; inşa edileceği bölgede yer alan emsallerinin gelişen mimari tarz ve tasarımlarının incelenerek yeniden ele alınması gereklidir. Planlarında kullanıcının yorulmayacağı iç mekân erişimini etkileyecek boyutsal farklılıkların pozitif yönde olması önemlidir. Taşıyıcılığında tercih edilecek sistemlerin doğal koşullara uyumu ve geçilecek açıklıkların kullanıcı ve kullanım amacına uygun olması önemlidir. Ayrıca geri dönüştürülebilir ekolojik malzeme ve sistem tercihi konusu

araştırılarak yapılmalıdır. Camilerde kullanılacak taşıyıcı ve diğer elemanlar için malzeme seçimi yerel malzemelerden gerçekleştirilmelidir. Böylece malzeme tedarikinin farklı yerlerden taşınmasında çevreye verilecek zararlar azalacaktır. Üretimi sırasında ortaya çıkacak atıkların çevreye zarar vermemesi önemlidir. Kullanım sırasında gerekli olan enerji sarfiyatının minimum düzeyde tutulması için kendine yetebilen, kendi enerjisini doğaya zarar vermeden üretebilen sistemler tercih edilmelidir.

Yapıların vakit namazları ile Cuma, bayram veya teravih namazlarında kullanılma durumları eşit olmadığı için tasarımcı yapının alabileceği en yüksek kişi sayısına göre tasarım yapmaktadır. Bu sebeple ortaya büyük, aydınlatması ve ısıtılması zor yapılar çıkmaktadır. Buna karşın yapılarda alttan ısıtma sistemine geçilmesi önemlidir. Bu sistemle kullanılan yerlerin ısıtılmasıyla önemli ölçüde ısıtma maliyetinden kurtulmuş olunur. Buna ek olarak uygun cephesel tasarımlarla gün ışığından yeterince faydalanması da hem ısıtım hem de yapının ısınması yönünde önemlidir.

Bu çalışmada ortak kamu kullanımı içerisinde önemli yeri olan camilerde ekolojik yaklaşımları artırması ve tarihi camilerde deneyimlenerek düzeltilebilen veya düzeltilemeyen sorunların yeni yapıları yönlendirmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın bundan sonraki tüm yapılarda kullanım amaçları dahilinde gerekli ölçüt ve hedefler ışığında yol göstermesi umut edilmektedir.

Teşekkür

Çalışma kapsamında; alan incelemelerinde yardımcı olan, Y. İnşaat Mühendisi Muhammed Burak YAŞAR ve Erhan AKGÜN'e teşekkürlerimizi sunarız.

Kaynakça

- [1] Tönük, S., (2001). Bina Tasarımında Ekoloji. Yıldız Teknik Üniversitesi Basım Yayın Merkezi Matbaası, İstanbul.
- [2] Crowther, RL, (1992). Ekolojik Mimarlık, Boston: Butterworth Mimarlık.
- [3] Kısa Ovalı, P. (2009). Türkiye İklim Bölgeleri Bağlamında Ekolojik Tasarım Ölçütleri Sistematiğinin Oluşturulması "Kayaköy Yerleşmesinde Örneklenmesi", Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi,
- [4] Uç, B. (2023). Ekolojik Mimari Tasarımda Biyomimikri ve Ekomimikri. YDÜ Mimarlık Fakültesi Dergisi, 5(2), 1-20. <https://doi.org/10.32955/neujfa202352782>
- [5] Durak, Ş., ve Ayyıldız, S. (2022). Geleneksel kırsal konutların ekolojik açıdan değerlendirilmesinde bir model denemesi: Yalova örneği. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 38(1), 85-102.
- [6] Parlak Biçer, Z. Ö., Yağmur, Y., ve Bektaş, İ. (2020). Günümüz Ekolojik Tasarım Kriterlerinin İncelenerek Tarihi Yapılardaki Ekolojik İzler ile Karşılaştırılması: Talas-Kayseri Örnek Alanı. Online Journal of Art and Design, 162-183.
- [7] Arslantaş, A. Ş., (2022). A Study on Examining Present Mosque Architecture within the Scope of Sustainability Principles, 2. Mediterranean Scientific Research and Innovation Congress, 957- 965.
- [8] Oral Patacı, Ö. (2020). Ardahan'ın Tarihi Mimarisi: Türk ve Çarlık Rus Dönemleri Yapılarına Toplu Bir Genel Bakış. Belgü, (5), 27-87.
- [9] Stadler, J., Mungai, G. ve Brandl, R. (1998). Weed invasion in East Africa: insights from herbarium records. African Journal of Ecology, 36, 15-22.
- [10] Polis, G. A., (1991) Complex trophic interactions in deserts: an empirical critique of food-web theory. Am Nat 138:123-155
- [11] Belek, A. N., ve Yamaçlı, R. (2023). Ekolojik Binaların Sürdürülebilir Tasarım Kriterleri ve Değerlendirme Süreci. Mimarlık Ve Yaşam, 8(2), 529-550. <https://doi.org/10.26835/my.1219441>
- [12] Steadman, P., Energy, Environment and Building Cambridge, Cambridge University Press, 1998.
- [13] Hasol, D. (2014). Ansiklopedik Mimarlık Sözlüğü.
- [14] Rashid AFA, Yusoff S., (2015), "Bina endüstrisi için yaşam döngüsü değerlendirme yönteminin gözden geçirilmesi", Yenilenebilir ve Sürdürülebilir Enerji İncelemeleri, 45, 244-248.
- [15] Ng WY, Chau CK, (2015), Yapı malzemelerinin yeni ömrü - geri dönüşüm, yeniden kullanım ve geri kazanım, Energy Procedia, 75, 2884-2891.
- [16] Thormark C., (2002), "Bir yaşam döngüsünde düşük enerjili bir bina - yerleşik enerjisi, işletme için enerji ihtiyacı ve geri dönüşüm potansiyeli", Bina ve Çevre, 37, 429-435.
- [17] Wachberger, M., Wachberger, H. (1988). Güneş ve Konut-Güneş ile İnşa Etmek, Pasif Güneş Enerjisi Kullanımı, E+P Konut Dergisi, Yaprak Kitabevi, Ankara,
- [18] Geisler, E., (1997), "Nachaltige Entwicklung ind Regionalplanung", In: Atabay, S. (ed), Ökologisch Orientierte Regionalplanung, YTÜ, İstanbul, s: 51

- [19] Yılmaz, M., (2007). Mimarlık ve Çevre, (Çevre ve Politika: Başka Bir Dünya Özlemi, Editör: Aysegül Mengi, İmge Kitabevi Yayınları, Sayfa No 75-92,
- [20] Aytis, S., Polatkan, I. (2009). Ekolojik Mimarlık Kavramı ve Temel İlkeler, Uluslararası Ekolojik Mimarlık ve Planlama Sempozyumu, Ankara.
- [21] Uffelen, C. V. (2009). Ecological Architecture. Architecture in Focus Series. Braun Publishing.
- [22] Türkmenoğlu B. N., (2011). Sürdürülebilir Mimarlık Bağlamında geleneksel mimaride ekolojik standartlar. Güney Mimarlık, Dosya, 6, 19-22.
- [23] Alparslan, B., Gültekin, A. B., ve Belgin Dikmen, Ç. (2009). Ekolojik yapı tasarımlarının Türkiye'deki güneş evleri kapsamında incelenmesi. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13-15 Mayıs 2009, Karabük.
- [24] Porteous, C. (2013). The new eco-architecture: alternatives from the modern movement. Taylor ve Francis.
- [25] Burkut, E. B., ve Dal, M. (2023). Systematic Literature Review and Scientific Maps on Ecological Architecture and Eco-Architecture. International Journal of Pure and Applied Sciences, 9(2), 369-380. <https://doi.org/10.29132/ijpas.1365407>
- [26] Lau, P. (2005). Eco Architecture. Green Building Design: Experiences in Hong Kong and Shanghai, 73.
- [27] Horst Klenier, Ökologische Architektur-Ein Wettbewerb, (Callwey Verlag, Münnhen, Sayfa No 8, 1995).
- [28] Sue Roaf, Ecohouse 2; A Design Guide, (Architectural Press, London, Sayfa No 1-273, 2003).
- [29] Yeang K., (2012), "Ekotasarım: Ekolojik Tasarım Rehberi", 1.Baskı, YEM.
- [30] Edwards, B., (2007), "Sürdürülebilirlik Kültürü ve Mimari Tasarımın Önündeki Güçler", Ekolojik Mimarlık ve Planlama Ulusal Sempozyumu, Antalya, s:22-34.
- [31] Çetin, S., (2010). Geleneksel Konut Mimarisinin Ekolojik Yansımaları: Burdur Örneği. 5. Ulusal Çatı ve Cephe Sempozyumu. (<http://catider.org.tr/pdf/sempozyum5/Semp%205%20Bildiri%2015.pdf>), (Erişim Tarihi: Ocak 2016).
- [32] DMİ. (2006). Devlet Meteoroloji İşleri Ardahan İstasyonu 1975-2006 Dönemi Ortalama ve Ekstremler Klimatoloji Bülteni. Ankara.
- [33] Öztürk, M. Z., Çetinkaya, G., ve Aydın, S. (2017). Köppen-Geiger iklim sınıflandırmasına göre Türkiye'nin iklim tipleri. Coğrafya Dergisi, (35), 17-27.
- [34] Öztürk, M. Z. ve Kılıç, H. (2018). Ardahan'da iklim parametrelerindeki değişimin zamansal Analizi. Türk Coğrafya Dergisi, (70), 37-43.
- [35] Kırzioğlu, M.F., (1970). Kars İli ve Çevresinde Ermeni Mezalimi 1918-1920. Ankara, Türkiye: Kardeş Matbaası, 121.
- [36] Bayraktar, N., (2002). Ardahanım, Bütün Yönleriyle Ardahan. İstanbul, Türkiye: Berfin Basın Yayın, 41
- [37] Eyüpgiller, K. K., (2000). "Türkiye'de Çağdaş Cami Mimarisi: İstanbul'dan Örnekler", Yapı Dergisi, 229, 59-71.
- [38] Çoruhlu, Y., (2000). Türk İslam Sanatının ABC'si, Kabalcı Yayınları, İstanbul
- [39] Aslanapa, O., (1999). Türk Sanatı, Remzi Kitabevi, İstanbul, 275-281.
- [40] Küçük, L., (2014). Tarihi Belgeler ve Tanıkların Beyanatları Işığında Ardahan'da Ermeni Mezalimi: 'Yanık Cami' Örneği. Yeni Türkiye Dergisi, 60,
- [41] Gündoğdu, H., (2000). Kaleler ve Kuleler Kenti Ardahan, Ardahan Valiliği Kültür Yayınları No: 4, Ankara, Türkiye: Ajans-Türk Basın ve Basım A.Ş., s.192
- [42] Kılıç, U. (2019). Kars, Ardahan ve Iğdır'daki (Merkez ve İlçeler) Türk İslam Dönemi Mimari Eserleri, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, s.121.
- [43] Ardahan Valiliği, (2002). Serhat Şehri Ardahan, s.67
- [44] Nuh, G. (2017). <https://www.aa.com.tr/tr/turkiye/samanlik-yapilan-asirlik-cami-78-yil-sonra-yeniden-ibadete-acildi/893840> (Erişim Tarihi: 28.03.2023).
- [45] Yüksek, İ. (2008). Geleneksel Anadolu mimarlığında ekolojik uygulamalar üzerine bir araştırma (Kırklareli kırsal alan örneği), Doktora tezi.
- [46] Özür, M. O. Mimari tasarımların ekolojik açıdan geliştirilmesine yönelik ölçütler kılavuzu önerisi, Doktora tezi.
- [47] Arslan, H., D. (2022). Konya Sonsuz Şükran Köyü Konutlarının Ekolojik Yönden İncelenmesi (Kitap Bölümü)
- [48] Gökşen, F., Güner, C., ve Koçan, A. (2017). Sürdürülebilir kalkınma için ekolojik yapı tasarım kriterleri. Akademia Disiplinlerarası Bilimsel Araştırmalar Dergisi, 3(1), 92-107.
- [49] Dikmen, Ç. B. (2011). Enerji etkin yapı tasarım ölçütlerinin örneklenmesi. Politeknik Dergisi, 14(2), 121-134.
- [50] Dişli, G., ve Mankır, A. D. (2021). Geleneksel Akşehir Evlerinde İşlevsel Sistemlerin Ekolojik ve Enerji Etkin Tasarım Ölçütleri Açısından İncelenmesi. Türk İslâm Medeniyeti Akademik Araştırmalar Dergisi, 16(32), 257-286.
- [51] Taşcı, B., ve Pekdoğan, T. (2018). Kozbeyli Kırsal Yerleşiminde Geleneksel Konut Mimarisinin Ekolojik Sürdürülebilirlik Bağlamında İncelenmesi. TÜBAV Bilim Dergisi, 11(1), 1-18.

- [52] Özür, M. O. (2012). Binalarda enerji korunumunu sağlayan fiziksel çevre ölçütleri. *Beykent Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(1-2), 95-107.
- [53] Emel, P., ve Şenyiğit, Ö. Ekolojik ve Sürdürülebilir Mimarlıkta Ekolojik Değerlendirme Yöntemleri.
- [54] Efe Yavaşcan, E., ve Urak, Z. G. (2019). Geleneksel Niğde Evlerinde Enerji Etkin Yapı Tasarımının İncelenmesi.
- [55] Yüksel, F. C. G., ve Söğüt, M. A. Geleneksel Bodrum Evlerinde Sürdürülebilirliğin Konut Tipolojisi Bakımından İncelenmesi. *Mimarlık ve Yaşam*, 6(1), 77-93.
- [56] Yılmaz, M., ve Yıldız, S. (2015). Askeri Binalar İçin Sürdürülebilirlik Ölçütleri. *Savunma Bilimleri Dergisi*, 14(2), 165-188.
- [57] Yağmur, Y. (2017). Günümüz Ekolojik Tasarım Kriterlerinin İncelenerek Tarihi Yapılardaki Ekolojik İzler ile Karşılaştırılması: Talas-Kayseri Örnek Alanı (Doctoral dissertation, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, Kayseri).
- [58] Al Şensoy, S., ve Kukoğlu, S. (2020). Doğu Karadeniz Kırsal Mimari Örneği Serenderlerin Ekoloji ve Sürdürülebilirlik Bağlamında İncelenmesi. *İnönü Üniversitesi Sanat ve Tasarım Dergisi*, 10(21), 25-44.
- [59] Biçer, Ö. P. Yukarı Talas Gülbenkyan Yapılarında Ekolojik Kriterlerin İncelenmesi. *Mimarlık ve Yaşam*, 8(3), 655-692.
- [60] Vardar, A. E., ve Karadayı, T. T. (2020). Darıca İlçesindeki Mevcut Konut Gruplarının Ekolojik Açından Değerlendirilmesi. *Kent Akademisi*, 13(2), 371-386.
- [61] Demircan, R. K., ve Gültekin, A. B. (2017). Binalarda pasif ve aktif güneş sistemlerinin incelenmesi. *TÜBAV Bilim Dergisi*, 10(1), 36-51.
- [62] Yazıcıoğlu, D. A. Bina Entegre Aktif ve Pasif Güneş Enerji Sistemlerinin İncelenmesi. 1. Ulusal Geri Kazanım Kongre ve Sergisi, 98.

Refractive Index Sensor and Cancer Cell Detection with Plasmonic-Based Three-Band Nearly Perfect Absorber

Ahmet Murat Erturan*¹, Seyfettin Sinan Gültekin¹

*¹Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Electrical-Electronics Engineering, Konya

(Alınış / Received: 03.07.2024, Kabul / Accepted: 13.08.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.08.2024)

Keywords

Plasmonic biosensor, perfect absorber, refractive index sensor, cancer detection

Abstract: In this study, an antenna providing nearly perfect absorption in triple-bands operating in the mid-infrared region is proposed. The nearly perfect plasmonic absorber, featuring nanoring and nanocross antennas, demonstrated high absorption efficiencies in numerical simulations. The triple-band absorber exhibited absorption rates of 95.2%, 97.3%, and 98.1% at wavelengths of 2730 nm, 4609 nm, and 7510 nm, respectively. High absorption values explain that the localized plasmon between the dielectric and metal layers of the antenna is quite strong. These high-energy resonance modes generated by subwavelength particles enable the sensor surface to respond robustly to varying environmental conditions. The strong response highlights the capability of the sensor to detect pathogens, biomolecules, chemicals, and organisms. The variable response of each resonance mode supports the identification of biomolecules. In order to demonstrate the sensitivity of the proposed three-band perfect absorber sensor, its responses to varying refractive indices were examined, and its sensitivity was calculated. The proposed three-band perfect absorber is shown to have sensitivity values of 112.23 nm/RIU, 497.17 nm/RIU, and 841.94 nm/RIU, respectively. According to the changing refractive indices of each resonance mode, the figure of merit values was calculated as 3.67 RIU⁻¹, 1.369 RIU⁻¹, and 1.271 RIU⁻¹, respectively. The numerical results show that the sensor can detect refractive index changes sensitively. A change in the refractive index is observed between normal cells and cancer cells, and it is tested whether the sensor can detect this change. To demonstrate the sensing ability, changes in resonance modes with different cancer cells such as skin, blood, cervical, adrenal gland and lung cells were examined. The proposed nearly perfect absorber was able to detect these cancer cells at high sensitivity values of 3.67 RIU⁻¹, 1.369 RIU⁻¹, and 1.271 RIU⁻¹.

Plazmonik Tabanlı Üç Bantlı Neredeyse Mükemmel Soğurucu ile Refractive Index Sensörü ve Kanser Hücresi Algılaması

Anahtar Kelimeler

Plazmonik biyosensör, mükemmel soğurucu, kırılma indisi sensörü, kanser tespiti

Öz: Bu çalışmada, orta kızılötesi bölgede çalışan üçlü bantlarda neredeyse mükemmel soğurucu sağlayan bir anten önerilmektedir. Nanohalka ve nanoçapraz antenlere sahip neredeyse mükemmel plazmonik soğurucu, sayısal simülasyonlarda yüksek soğurucu verimlilikleri göstermiştir. Üçlü bant soğurucu, sırasıyla 2730 nm, 4609 nm ve 7510 nm dalga boylarında %95.2, %97.3 ve %98.1 soğurucu oranları sergilemiştir. Yüksek soğurucu değerleri, antenin dielektrik ve metal katmanları arasındaki yerleşmiş plazmonun oldukça güçlü olduğunu açıklamaktadır. Alt dalga boylu parçacıklar tarafından üretilen bu yüksek enerjili rezonans modları, sensör yüzeyinin değişen çevre koşullarına güçlü bir şekilde yanıt

vermesini sağlar. Güçlü yanıt, sensörün patojenleri, biyomolekülleri, kimyasalları ve organizmaları tespit etme yeteneğini vurgular. Her rezonans modunun değişken yanıtı, biyomoleküllerin tanımlanmasını destekler. Önerilen üç bantlı mükemmel soğurucu sensörün duyarlılığını göstermek amacıyla, değişen kırılma indislerine verdiği tepkiler incelendi ve duyarlılığı hesaplandı. Önerilen üç bantlı mükemmel soğurucunun sırasıyla 112,23 nm/RIU, 497,17 nm/RIU ve 841,94 nm/RIU duyarlılık değerlerine sahip olduğu gösterildi. Her bir rezonans modunun değişen kırılma indislerine göre, değer rakamı değerleri sırasıyla 3,67 RIU⁻¹, 1,369 RIU⁻¹ ve 1,271 RIU⁻¹ olarak hesaplandı. Sayısal sonuçlar, sensörün kırılma indisi değişimlerini hassas bir şekilde algılayabildiğini göstermektedir. Normal hücreler ve kanser hücreleri arasında kırılma indeksinde bir değişiklik gözlemlenir ve sensörün bu değişikliği algılayıp algılayamadığı test edilir. Algılama yeteneğini göstermek için cilt, kan, servikal, adrenal bez ve akciğer hücreleri gibi farklı kanser hücreleriyle rezonans modlarındaki değişiklikler incelendi. Önerilen neredeyse mükemmel soğurucu, 3,67 RIU⁻¹, 1,369 RIU⁻¹ ve 1,271 RIU⁻¹ gibi yüksek hassasiyet değerlerinde bu kanser hücrelerini tespit etmeyi başarmıştır.

*İlgili Yazar, email: amerturan@ktun.edu.tr

1. Introduction

Metamaterials are artificially produced materials that show extraordinary optical characteristics [1]. Such materials are sandwich structures consisting of metal and dielectric materials with dimensions much smaller than the wavelength of light [2], [3]. Surface plasmon polaritons (SPP) propagating along these metal and dielectric surfaces exhibit extraordinary optical properties by changing the classical diffraction behavior of light [4]. While a flat metal surface reflects light strongly, a geometrically patterned metal surface exhibits intense light absorption capacity when combined with a dielectric interface [5]. A strong optical near field occurs across the metal and dielectric surface, thanks to a phenomenon called surface plasmon resonance (SPR). Moreover, patterning this metal layer with subwavelength nanoparticles reveals Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR), resulting in tunable optical responses. In this way, light is localized around nanoparticles, creating high electrical and magnetic regions in narrow areas. The ability to manipulate light has become very popular in different fields such as biosensors [6], [7], [8], photodetectors [9], optical switches [10], optical filters [11], and photovoltaic systems [12].

Plasmonic-based structures are strong candidates for biosensing due to their advantages of strong electromagnetic surface confinement and local field enhancement [13]. Subwavelength particles not only tune the resonance mode over a wide area but also create electric and magnetic fields that are confined to the sensor surface [14], [15]. These confined and strong fields absorb a large portion of the incoming electromagnetic wave when they are compatible with the free space impedance. These high absorption points are called resonant modes. These deep dips seen at certain wavelengths are very sensitive to changes in the environment. This sensitivity exhibits a sensor behavior and gives different optical responses to changes on its surface. These features provide a significant advantage among refractive index (RI) sensors. When incident light interacts with the surface, excited plasmons produce electromagnetic fields that are highly sensitive to small changes in concentrations present at the sensor surface, causing a spectral shift in the resonance mode. Precise detection of biomolecules can be achieved with high sensitivity (S) and Figure of Merit (FoM) values based on the spectral shift occurring in the resonance mode [16], [17]. The FoM and S values are important parameters for investigating the sensitivity of the RI sensor platform and vary in direct proportion to the ability to measure RI changes. These parameters are directly affected by the metals as they are known to cause high optical losses leading to relatively broadband spectral responses [18]. It is possible to overcome this disadvantage in two ways: one way is to develop a multiband sensor platform in the mid-IR region and examine the spectral shifts in multiple resonance modes and the other way is to develop a sensor operating at the near mid-IR spectrum since the sensor shows narrow-band spectral responses at this region [19], [20].

In this study, a plasmonic near-perfect absorber nanoantenna structure with perfect absorption capacity in three different frequency bands was proposed. This absorber was configured and optimized with nanocross and a nanoring geometry to achieve a high absorption rate simultaneously in three bands. Numerical analyses revealed that the absorber showed an absorption performance of 95.2%, 97.3%, and 98.1% at wavelengths of 2730 nm, 4609 nm, and 7510 nm, respectively. The strong absorption allows the absorber to detect changes in the surface more sensitively. To demonstrate the sensing capacity based on the spectral shift, the absorber surface was coated with dielectric material with different refractive indices ranging from 1 to 1.8. The sensitivity values of the absorber at each mode are 112.23 nm/RIU, 497.17 nm/RIU, and 841.94 nm/RIU, respectively. In addition, the FoM

value of each resonance mode of the absorber was calculated as 3.67 RIU⁻¹, 1.369 RIU⁻¹, and 1.271 RIU⁻¹, respectively. The detection capability of this absorber has been tested to demonstrate its potential for detecting certain types of cancer. Cancer is a common disease worldwide and its mortality rate is quite high. A delay in diagnosing cancer significantly increases the mortality rate. In addition, the late treatment of cancer disease also leads to exposure to intense toxicity. For this reason, early diagnosis of cancer increases the chance of survival and ensures that the treatment process is completed with less damage. Additionally, some types of cancer are asymptomatic and can progress quite aggressively [21]. Therefore, frequent tests become very important for a high chance of survival. All these reasons suggest that plasmonic biosensors may be strong candidates for the detection of some types of cancer. Plasmonic biosensors facilitate molecular detection due to their sensitive, fast, and label-free detection capabilities. There are significant differences between the RI values of normal and cancerous cells in the human body. For example, the RI value was measured as 1.401 in a blood sample originating from MCF-7 breast cancer and 1.39 in a sample contaminated with T-type leukemia [22]. As an indicator of the cancer detection ability of the nearly perfect absorber platform, changes in the spectral position of each resonance mode were examined based on Basal, Jurkat, HeLa, PC-12, (MDA)-(MB)-231, MCF-7 cancer cells. The three-band resonance modes of our proposed nearly perfect absorber platform responded to each cancer cell with specific spectral shifts and demonstrated label-free detectability of these cells.

2. Materyal ve Metot

The proposed complex triple-band nearly perfect absorber structure is shown in Figure 1a. A nearly perfect absorber structure consists of metal-dielectric-metal layers. A gold material is selected for both metal layers and the dielectric plate is set for MgF₂ material. The refractive indices and dielectric constants of all materials are taken from Palik [23]. Numerical analysis of PPA was carried out using the Finite Element Difference in Time (FDTD) method. The thick Au layer at the bottom serves as an optical mirror to prevent any possible light transmission. The period of a single cell is 2600 nm for both the *x*- and *y*-axis. The thickness (*t_d*) of the dielectric plate between two gold layers is 150 nm. The top gold resonator is formed by placing two identical rectangles inside a ring to provide near-perfect absorption in three bands, simultaneously. The length of the nano cross is *L* = 1300 nm and their width is *w* = 200 nm. The thickness of these nano cross is optimized to *t_m* = 100 nm. The outer radius of a ring surrounding nano cross is determined as *r₂* = 900 nm and the inner radius is determined as *r₁* = 700. Therefore, as shown in Fig. 1a., the width of the Au nanoring along the ring is stabilized at 200 nm (*r₂* - *r₁*). The nanoring and nano cross resonators have 100 nm (*t_m* = *t_d*) thickness for optimum results. Numerical analyses were carried out with commercial software, Lumerical FDTD. Periodic boundary conditions along the *x* and *y*-axis and perfectly matched layer boundary conditions along the *z*-axis were used in the simulations. The absorption capacity of the proposed absorber can be calculated using the *A*(*ω*) formula given below in Eq. (1) [24], [25]:

$$A(\omega) = 1 - T(\omega) - R(\omega) \quad (1)$$

Here; *R*(*ω*) is the reflection, *T*(*ω*) is the transmission coefficients and *A*(*ω*) is the absorption value. The gold layer at the bottom acts as an optical mirror and prevents transmission. If the reflection is zero, the absorption goes to unity. The spectral response of reflection and absorption spectra obtained as a result of the numerical analysis of PPA is shown in Fig. 2b. It is observed that the nanoantenna demonstrates nearly-perfect absorption at *λ*₁ (2730 nm), *λ*₂ (4609 nm), and *λ*₃ (7510 nm) three resonance modes, simultaneously.

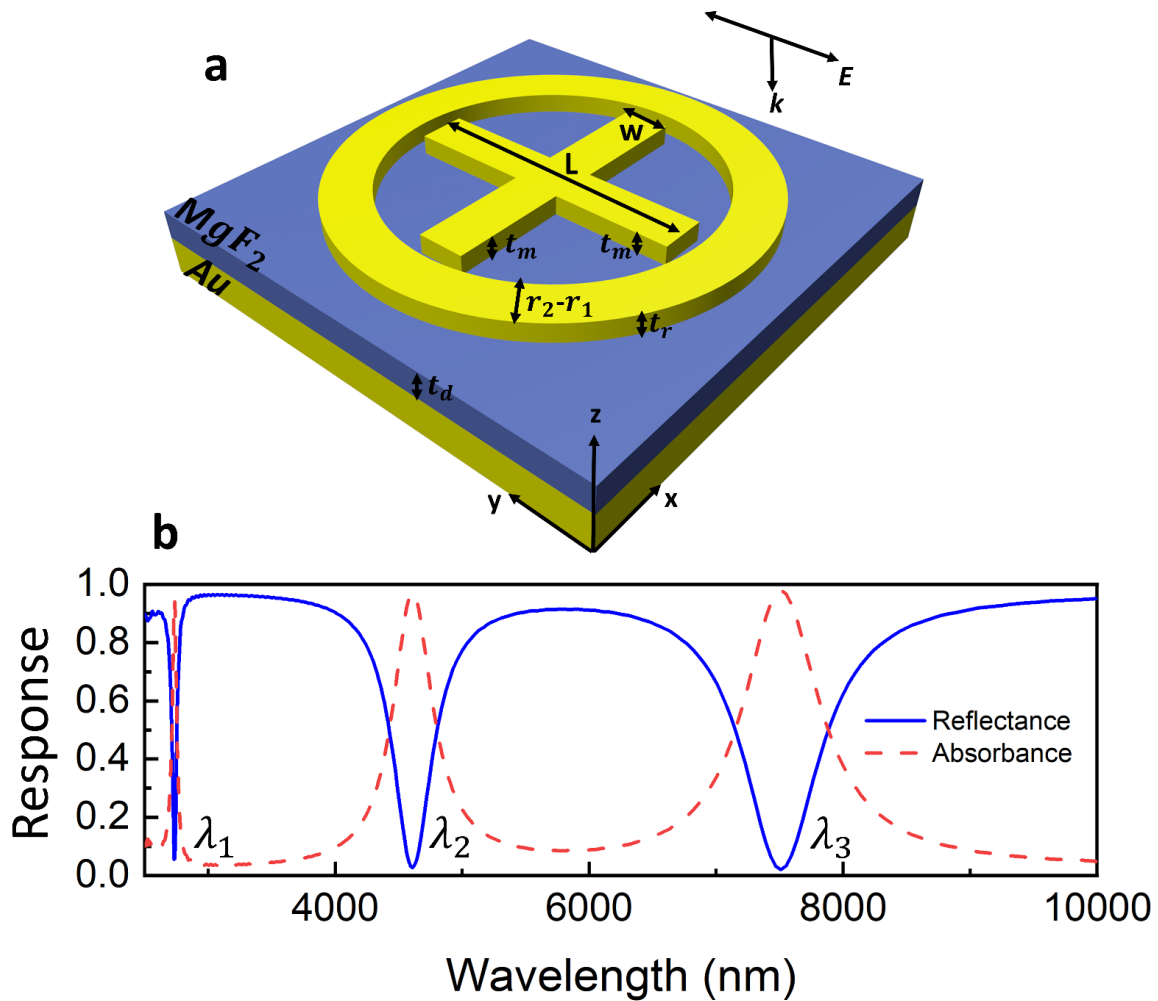


Figure 1. **a.** Model of the near-perfect absorber platform consisting of nanoring and nano-rectangular resonators. **b.** resonance modes of the perfect absorber platform occurring in three bands in the mid-infrared region (blue signal represents reflection, red signal represents absorption)

The resonance modes of the nearly perfect absorber consisting of nanoring and nano-rectangular resonators depend specifically on these geometries. The electric field distributions are shown in Fig. 2 to physically explain how resonance modes occur. Accordingly, the electric field distribution changes that occur during each resonance mode are shown in Fig. 2a., Fig. 2b., and Fig. 2c. According to the electric field distribution graphs, the narrow-band first resonance mode (λ_1) developed around the ring-shaped nano-antennas. The confined localized electric field distribution around ring nano-antennas is caused by plasmons oscillating between the metal and dielectric surface leading to the first resonance mode of the platform. In the second and third resonance modes, strong field enhancement is observed at the endpoints of the rectangular nano-antennas and the nanoring endpoints, respectively, lying parallel to the x-axis. This effect showed a dipole distribution and caused strong electric field confinement on both sides of each nanorod. A similar dipole effect was also seen at the ring ends in the final resonance mode. The gap (100 nm) between the rectangular nanorod and the nanoring enables the surface plasmons to be strongly localized and develop a strong field.

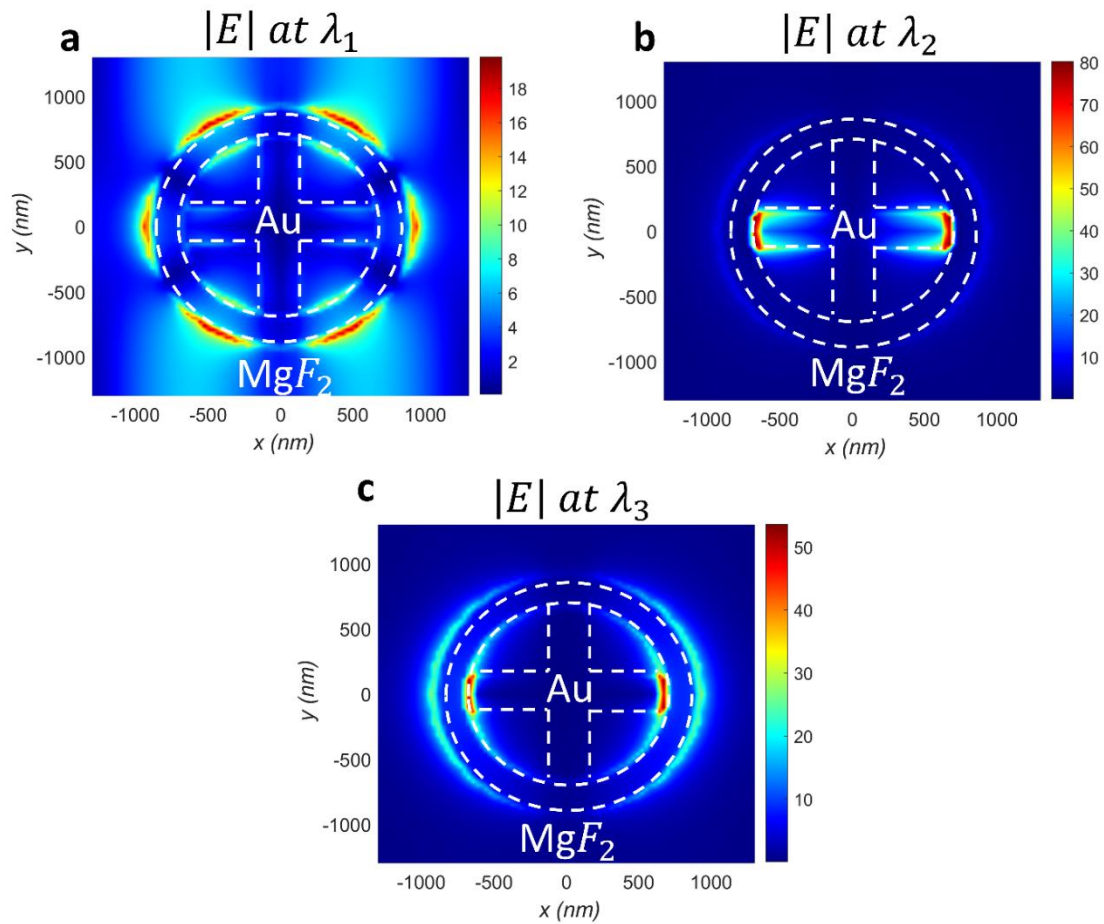


Figure 2. Electric field distribution graphs at **a.** λ_1 , **b.** λ_2 , **c.** λ_3 resonance wavelengths of nanoring and nano-rectangular resonators.

To more clearly analyze the dipole effect occurring in electric field distributions, the charge distributions of three different resonance modes are examined in Fig. 3. The nano ring forming the system and the two nanorods (cross-shaped) placed inside exhibit unique dipolar distributions at each mode. While the charge distributions rotating around the nanoring formed a plasmonic dipole, the nanocross inside also exhibited their own dipolar resonances. The fact that these charge distributions are drawn towards the regional endpoints of the nanorings and nanocross shows that they are structurally compatible. Fig. 3a. shows that in the first resonance mode, the charge distribution spreads throughout the nanoring and exhibits a rotating trend. Fig. 3b. clearly shows the dipole charge distribution polarized to the end regions of the nano-cross by the electric field distribution in the second resonance mode. Finally, the polarized charge distributions along the nanoring and nano cross for the third resonance mode are shown in Fig. 3c. Based on these graphs, a physical explanation of the triple resonance mode is made.

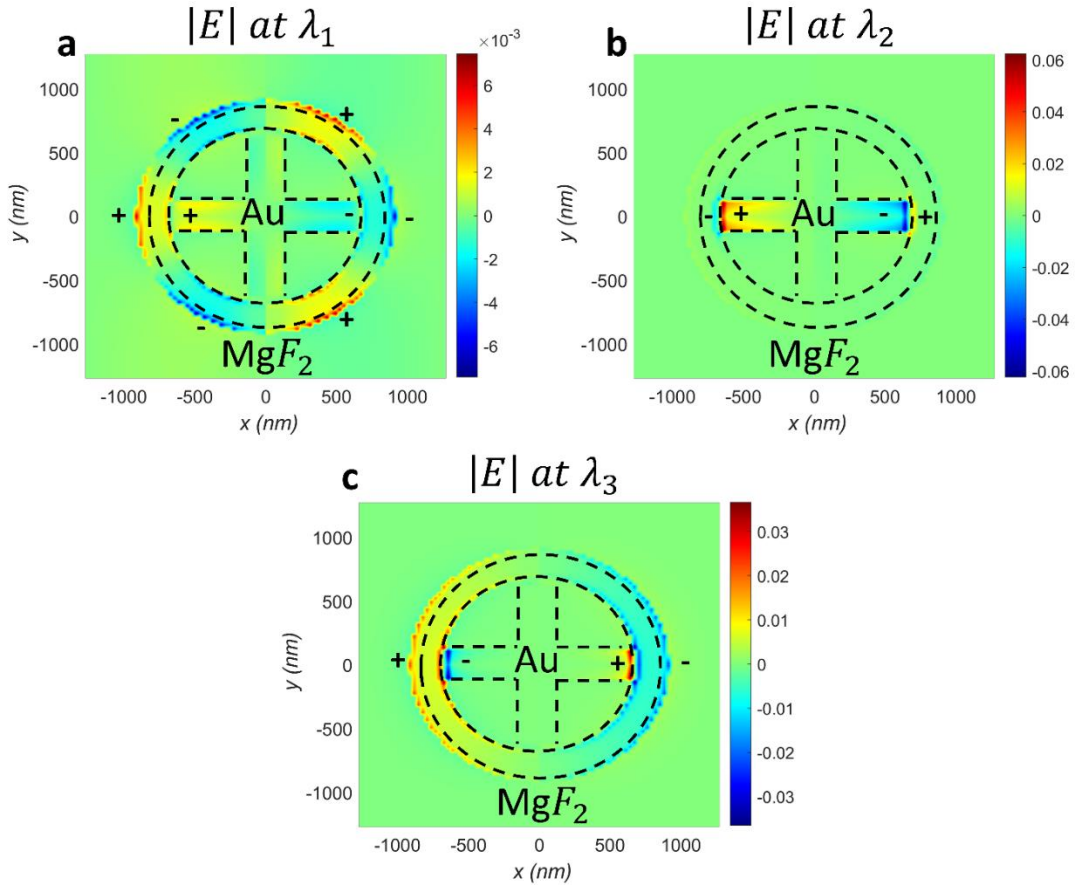


Figure 3. The charge distribution graphs at **a.** λ_1 , **b.** λ_2 , **c.** λ_3 resonance wavelengths of nanoring and nano-cross resonators.

3. Results

To demonstrate the RI detection ability of our proposed sensor platform based on its spectral properties, different refractive indices were examined. It is predicted that different resonance modes of the triple-band nearly perfect absorber will give different spectral responses. These spectral responses can be specifically measured and their sensitivity can be determined. High-sensitivity sensors respond to refractive index changes with a relatively larger spectral shift and shift to larger resonance wavelengths. As a result, they can detect biomolecules, proteins, chemical molecules, and different compounds, precisely. Sensitivity is one of the important factors as a measure of the detection capability of a triple-band nearly perfect absorber. The sensitivity of the sensor can be expressed as the change in wavelength per change in refractive index. To prove the sensitivity and performance of the sensor measurably, the performance of the triple-band nearly perfect absorber proposed in this study was measured by considering the RI change around it. The optical detection ability of the plasmonic RI sensor can be measured by its sensitivity (S) (Eq. (2)) [26], [27].

$$S = \frac{d\lambda}{dn} \quad (2)$$

Here, $d\lambda$ value expresses the amount of spectral shift in the resonance mode. The dn value indicates the amount of RI change that causes the spectral shift. Another important parameter used to determine the sensitivity of the sensor is the Figure of Merit (FoM) value given in Eq. (3) [28], [29].

$$FoM = \frac{S}{FWHM} \quad (3)$$

Here, S denotes the sensitivity given in equation 2, while FWHM is the full width at half maximum of the resonance mode. FoM indicates how effectively the sensor can measure small changes in RI. Generally, the FoM of plasmonic sensors may be low due to the inherent losses of metals [30]. However, it is still very important to express the detection performance of these sensors quantitatively. In addition, the FoM values were measured in each resonance mode and characteristic changes were examined. Fig. 4a shows the spectral response of the proposed triple-band nearly perfect absorber to changing medium refractive indices. Refractive indices were selected with a total of 9 different values ranging from 1 to 1.8, and the spectral shifts in each resonance mode are shown for λ_1 ,

λ_2 , and λ_3 . When the refractive index of the medium was 1, the first mode captured a resonance mode at 2730 nm, the second mode at 4609 nm, and the third mode at 7510 nm wavelengths. With the increase in the refractive index of the medium, spectral shifts occurred in the λ_1 (Fig. 4b), λ_2 (Fig. 4c) and λ_3 (Fig. 4d) resonance modes, and these shifts are shown in detail for each mode.

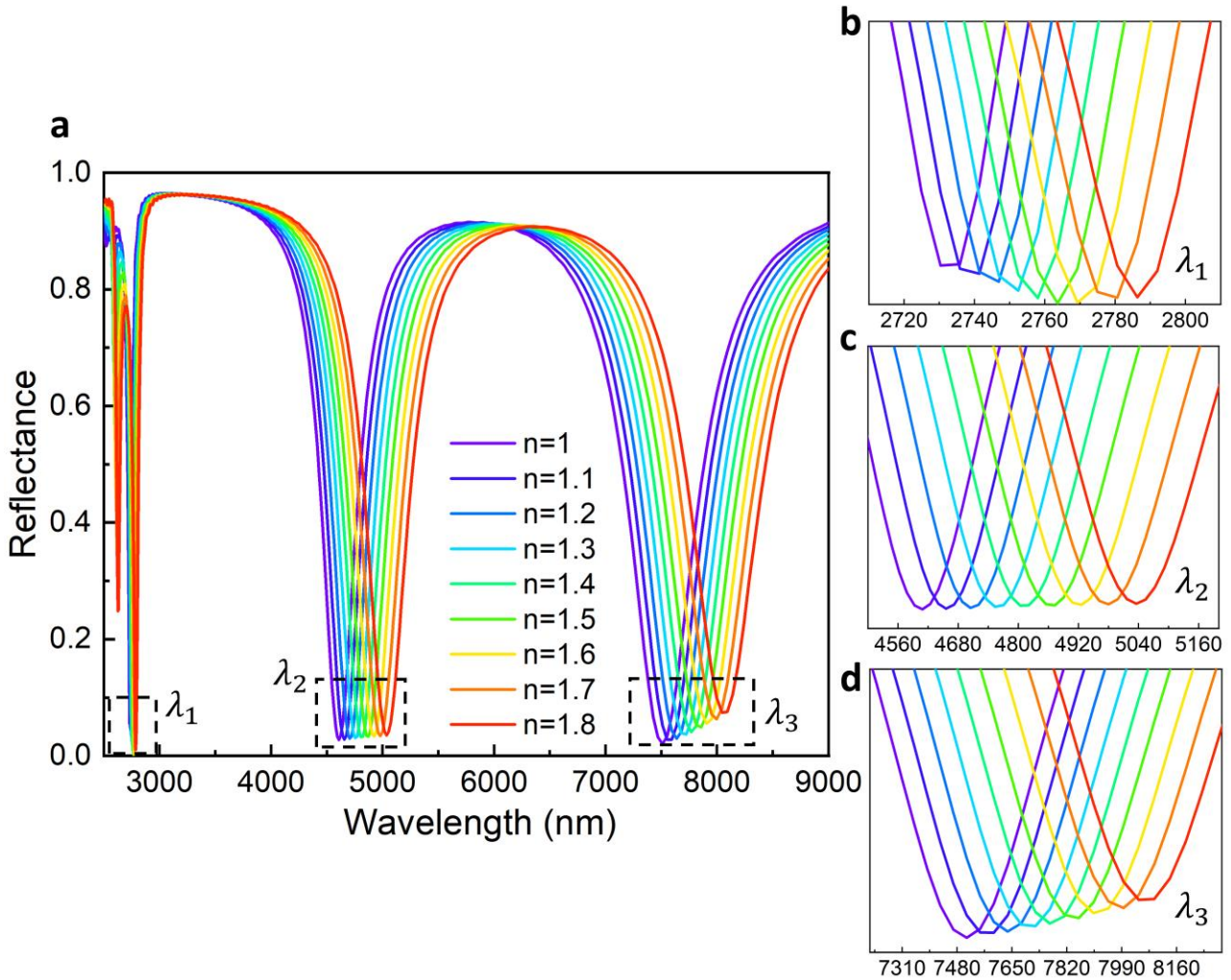


Figure 4. a. The refractive index of the surrounding medium was increased from 1.0 to 1.8, resulting in observable spectral shifts in the resonance modes of the triple-band nearly perfect absorber, specifically b. λ_1 , c. λ_2 , and d. λ_3 .

The S and FoM parameters of the sensor were calculated based on the spectral shifts in the resonance mode of the triple-band nearly perfect absorber against the changing medium refractive indices. All three resonance modes are located in different wavelength regions of the mid-IR region. Resonance modes can exhibit different characteristics of the spectrum. Note that the λ_1 wavelength resonance mode is in a rather narrow band compared to the other two modes. A low FWHM value is important in the detection to have a high FoM value (Equation 3). Although the λ_2 and λ_3 resonance modes exhibit broader spectral bands, they gave significant spectral responses to varying refractive indices. Depending on the changes in the refractive index, the amount of shift in the resonance mode was examined and the sensitivity was calculated for each resonance mode of the sensor. Fig. 5 shows Wavelength shift plots occurring in three different resonance modes. When looking at all three resonance modes, it is clear that they show a linear spectral shift depending on the changing refractive index of the medium. Depending on this linear change, the sensitivities for all three modes are $S_1 = 112.23$ nm/RIU (Fig. 5a.), $S_2 = 494.17$ nm/RIU (Fig. 5b.), and $S_3 = 841.94$ nm/RIU (Fig. 5c.), respectively. The sensitivity values were calculated using Equation 2. For FoM, which is another parameter of the detection ability of the triple-band nearly perfect absorber, the FWHM values of each resonance mode were calculated and found to be 30.57 nm, 360.97 nm, and 662.42 nm, respectively. Finally, FoM values were calculated for all three resonance modes as 3.67 RIU $^{-1}$, 1.369 RIU $^{-1}$, and 1.271 RIU $^{-1}$ for λ_1 , λ_2 , and λ_3 , respectively. The obtained results showed the spectral responses of the medium to the changing refractive index in all three resonance modes and proved the sensitivity ability of the sensor as shown in Figure 5.

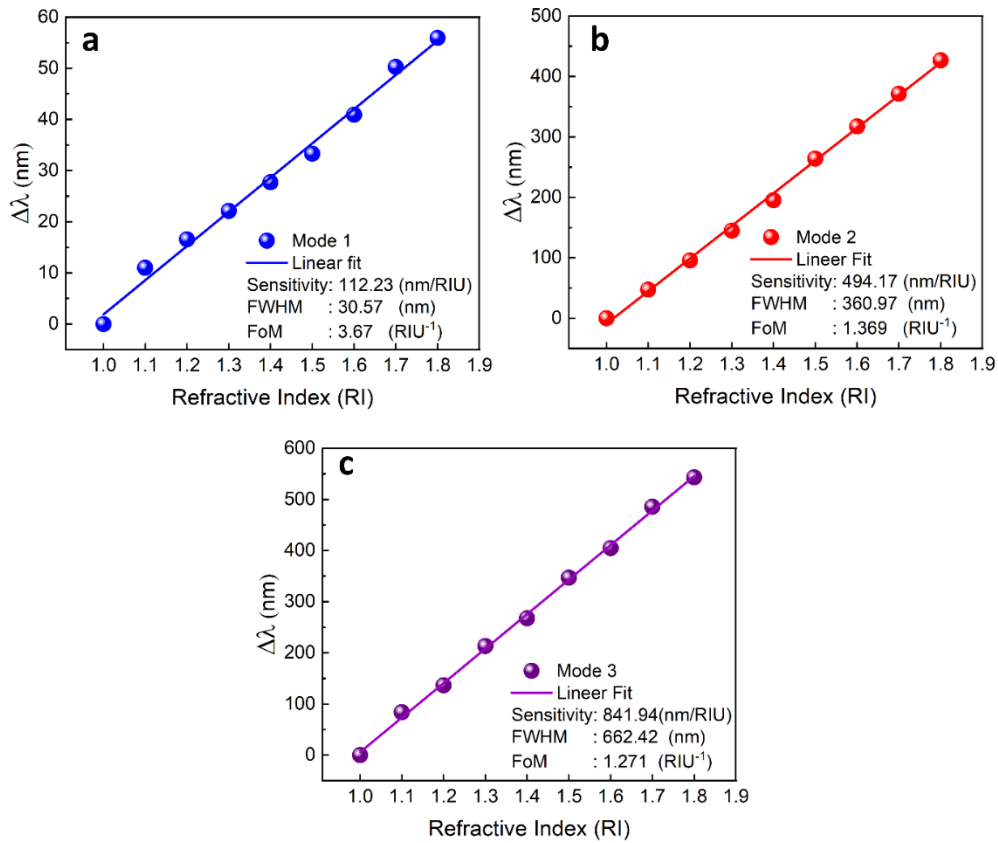


Figure 5. The variations in the three resonance modes due to changes in the refractive index of the medium are presented for **a.** λ_1 , **b.** λ_2 , **c.** λ_3 . Additionally, the sensitivity, FWHM, and FoM values for each resonance mode are provided.

To demonstrate the detection ability of our proposed nearly perfect absorber platform, different types of cancer cells were considered, and the spectral responses of each resonance mode of the sensor were examined. The difference in concentrations of normal cells and cancer cells causes changes in the refractive indices, increasing the chances of detecting cancer cells using RI sensors. Table 1 shows the refractive indices of normal cells and cancer cells from skin, blood, cervical, adrenal gland, and lung tissues. These data were taken from references [31], [32], [33], [34] and each type of cancer cell exhibited a specific increase in refractive index due to higher protein density. Accordingly, our proposed three-band nearly perfect absorber platform was tested with both normal and cancer cells. Each of the λ_1 , λ_2 , and λ_3 resonance modes exhibited spectral shifts depending on the different tissues. These spectral shifts moved the resonance modes to specific spectral values, demonstrating the ability of the platform to detect cancerous cells. Each resonance mode exhibited FoM values of 3.67 RIU^{-1} , 1.369 RIU^{-1} , and 1.271 RIU^{-1} , respectively.

Table 1. Changes in resonance wavelengths for λ_1 , λ_2 , and λ_3 due to varying refractive indices of (a) normal and (b) cancer cells.

Cancer Type	Cell Type	Refractive Index	λ_1 (nm)	λ_2 (nm)	λ_3 (nm)
(a) Normal Cell					
Skin	Basal	1.360	2755.041	4788.221	7776.33
Blood	Jurkat	1.376	2756.786	4796.310	7789.801
Cervical	HeLa	1.368	2755.898	4792.482	7783.066
Adrenal Gland	PC-12	1.381	2757.427	4798.804	7794.011
Breast	(MDA)-(MB)-231	1.385	2757.831	4800.774	7797.379
Breast	MCF-7	1.387	2758.071	4801.768	7799.062

(b) Cancer Cell					
Skin	Basal	1.380	2757.282	4798.306	7793.163
Blood	Jurkat	1.390	2758.410	4803.255	7801.542
Cervical	HeLa	1.392	2758.636	4804.237	7803.179
Adrenal Gland	PC-12	1.395	2758.94	4805.711	7805.671
Breast	(MDA)-(MB)-231	1.399	2759.419	4807.672	7809.424
Breast	MCF-7	1.401	2759.645	4808.669	7810.958

4. Conclusions

In this study, we propose a composite nearly perfect absorber composed of nanoring and nanocross structures. The nanoscale geometry of this configuration has been optimized to support multiple resonance modes. Operating in the mid-infrared region, this structure achieved nearly perfect absorption in three distinct modes at wavelengths of 2730 nm, 4609 nm, and 7510 nm, with absorption rates of 95.2%, 97.3%, and 98.1%, respectively. The basic physical phenomena underlying the resonance modes of the plasmonic structure are explained and the sensitivity of the sensor to changing refractive indices is demonstrated. The refractive index magnitudes on the sensor surface were changed with different values between 1 and 1.8, and linear spectral shifts were observed in all three resonance modes of the sensor. The sensing capability of the sensor was analyzed by calculating the S and FoM parameters separately for each resonance mode. The results show that the λ_1 , λ_2 , and λ_3 resonance modes have 112.23 nm/RIU, 497.17 nm/RIU, and 841.94 nm/RIU sensitivity and 3.67 RIU⁻¹, 1.369 RIU⁻¹, and 1.271 RIU⁻¹ FoM values, respectively. The λ_1 wavelength resonance signal, located at the beginning of the mid-infrared range, has a FWHM value of 30.57 nm and operates in a very narrow band. Accordingly, it responded very sensitively to changing refractive indices and enabled the sensor to have a high sensitivity value. In order to test the detection performance of the plasmonic biosensor, the changes caused by cancer cells with different refractive indices in three resonance modes were examined. For this purpose, normal and cancerous cell refractive indices of skin, blood, cervical, Adrenal Gland and lung cells were defined and tested on the sensor surface. The findings showed that all three resonance modes caused a spectral response depending on the change in cancer cells and a shift in the resonance mode occurred. These findings suggest a powerful solution to the diagnosis of cancer types whose late diagnosis is known to cause high mortality. Thanks to our proposed triple-band nearly perfect absorber, many biological and chemical molecules can be detected.




References

- [1] C. W. Qiu and T. W. Odom, "Introduction: Chemistry of Metamaterials," *Chemical Reviews*, vol. 122, no. 19. American Chemical Society, pp. 14987–14989, Oct. 12, 2022. doi: 10.1021/acs.chemrev.2c00541.
- [2] A. K. U. Michel, "Subwavelength hybrid plasmonic structures for nonlinear nanophotonics," *Light: Science and Applications*, vol. 10, no. 1. Springer Nature, Dec. 01, 2021. doi: 10.1038/s41377-021-00479-9.
- [3] X. Deng, L. Li, M. Enomoto, and Y. Kawano, "Continuously Frequency-Tuneable Plasmonic Structures for Terahertz Bio-sensing and Spectroscopy," *Sci Rep*, vol. 9, no. 1, Dec. 2019, doi: 10.1038/s41598-019-39015-6.
- [4] S. Khani and M. Afsahi, "Optical Refractive Index Sensors Based on Plasmon-Induced Transparency phenomenon in a Plasmonic Waveguide Coupled to Stub and Nano-disk Resonators," *Plasmonics*, vol. 18, no. 1, pp. 255–270, Feb. 2023, doi: 10.1007/s11468-022-01772-y.
- [5] D. G. Baranov, A. Krasnok, T. Shegai, A. Alù, and Y. Chong, "Coherent perfect absorbers: Linear control of light with light," *Nature Reviews Materials*, vol. 2. Nature Publishing Group, Oct. 04, 2017. doi: 10.1038/natrevmats.2017.64.
- [6] S. Mostufa et al., "Metamaterial as perfect absorber for high sensitivity refractive index based biosensing applications at infrared frequencies," *J Phys D Appl Phys*, vol. 56, no. 44, Nov. 2023, doi: 10.1088/1361-6463/aceb6f.
- [7] A. M. Erturan, S. S. Gultekin, and H. Durmaz, "Detection of 2,4-Dinitrotoluene by Metal-Graphene Hybrid Plasmonic Nanoantennas with a Golden Ratio Rectangular Resonator," *Elektronika ir*

- Elektrotechnika, vol. 29, no. 3, pp. 33–38, 2023, doi: 10.5755/j02.eie.33869.
- [8] A. M. Erturan, H. Durmaz, and S. S. Gültekin, “Simultaneous detection of molecules with the surface-enhanced infrared absorption sensor platform based on disk antennas with double spacer,” *Spectroscopy Letters*, vol. 56, no. 5, pp. 283–292, 2023, doi: 10.1080/00387010.2023.2208650.
- [9] J. Li et al., “Metamaterial grating-integrated graphene photodetector with broadband high responsivity,” *Appl Surf Sci*, vol. 473, pp. 633–640, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.apsusc.2018.12.194.
- [10] T. Wang et al., “Ultrafast metamaterial all-optical switching based on coherent modulation,” *Opt Express*, vol. 30, no. 6, p. 9284, Mar. 2022, doi: 10.1364/oe.449960.
- [11] E. Ahamed, M. R. I. Faruque, M. J. Alam, M. F. Bin Mansor, and M. T. Islam, “Digital metamaterial filter for encoding information,” *Sci Rep*, vol. 10, no. 1, Dec. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-60170-8.
- [12] M. Ossiander et al., “Metasurface-stabilized optical microcavities,” *Nat Commun*, vol. 14, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.1038/s41467-023-36873-7.
- [13] E. Mauriz and L. M. Lechuga, “Plasmonic biosensors for single-molecule biomedical analysis,” *Biosensors (Basel)*, vol. 11, no. 4, 2021, doi: 10.3390/bios11040123.
- [14] R. Yang et al., “Subwavelength optical localization with toroidal excitations in plasmonic and Mie metamaterials,” *InfoMat*, vol. 3, no. 5. Blackwell Publishing Ltd, pp. 577–597, May 01, 2021. doi: 10.1002/inf2.12174.
- [15] Y. Zhang et al., “Plasmonic tweezers: for nanoscale optical trapping and beyond,” *Light: Science and Applications*, vol. 10, no. 1. Springer Nature, Dec. 01, 2021. doi: 10.1038/s41377-021-00474-0.
- [16] V. G. Kravets, A. V. Kabashin, W. L. Barnes, and A. N. Grigorenko, “Plasmonic Surface Lattice Resonances: A Review of Properties and Applications,” *Chemical Reviews*, vol. 118, no. 12. American Chemical Society, pp. 5912–5951, Jun. 27, 2018. doi: 10.1021/acs.chemrev.8b00243.
- [17] B. Jafari et al., “Highly sensitive label-free biosensor: graphene/CaF₂ multilayer for gas, cancer, virus, and diabetes detection with enhanced quality factor and figure of merit,” *Sci Rep*, vol. 13, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-43480-5.
- [18] L. Hajshahvaladi, H. Kaatuzian, M. Moghaddasi, and M. Danaie, “Hybridization of surface plasmons and photonic crystal resonators for high-sensitivity and high-resolution sensing applications,” *Sci Rep*, vol. 12, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1038/s41598-022-25980-y.
- [19] S. Yang et al., “Single-peak and narrow-band mid-infrared thermal emitters driven by mirror-coupled plasmonic quasi-BIC metasurfaces,” *Optica*, vol. 11, no. 3, p. 305, Mar. 2024, doi: 10.1364/optica.514203.
- [20] J. Kim, K. Han, and J. W. Hahn, “Selective dual-band metamaterial perfect absorber for infrared stealth technology,” *Sci Rep*, vol. 7, no. 1, Dec. 2017, doi: 10.1038/s41598-017-06749-0.
- [21] R. C. Fitzgerald, A. C. Antoniou, L. Fruk, and N. Rosenfeld, “The future of early cancer detection,” *Nature Medicine*, vol. 28, no. 4. Nature Research, pp. 666–677, Apr. 01, 2022. doi: 10.1038/s41591-022-01746-x.
- [22] M. R. Nickpay, M. Danaie, and A. Shahzadi, “Highly Sensitive THz Refractive Index Sensor Based on Folded Split-Ring Metamaterial Graphene Resonators,” *Plasmonics*, vol. 17, no. 1, pp. 237–248, Feb. 2022, doi: 10.1007/s11468-021-01512-8.
- [23] E. D. Palik, S. Diego, L. Boston, N. York, and S. T. Toronto, “Hand book of Optical Constants of Solids Edited by,” 1998. [Online]. Available: <http://www.apnet.com>
- [24] N. I. Landy, S. Sajuyigbe, J. J. Mock, D. R. Smith, and W. J. Padilla, “Perfect metamaterial absorber,” *Phys Rev Lett*, vol. 100, no. 20, May 2008, doi: 10.1103/PhysRevLett.100.207402.
- [25] Y. Xie et al., “A multifrequency narrow-band perfect absorber based on graphene metamaterial,” *Diam Relat Mater*, vol. 137, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.diamond.2023.110100.
- [26] R. S. El Shamy, D. Khalil, and M. A. Swillam, “Mid Infrared Optical Gas Sensor Using Plasmonic Mach-Zehnder Interferometer,” *Sci Rep*, vol. 10, no. 1, Dec. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-57538-1.
- [27] G. Lin et al., “Ultra-compact high-sensitivity plasmonic sensor based on Fano resonance with symmetry breaking ring cavity,” *Opt Express*, vol. 27, no. 23, p. 33359, Nov. 2019, doi: 10.1364/oe.27.033359.
- [28] J. Wang, Z. Xu, and D. G. Kotsifaki, “Plasmonic and metamaterial biosensors: a game-changer for virus detection,” *Sensors and Diagnostics*, vol. 2, no. 3. Royal Society of Chemistry, pp. 600–619, May 01, 2023. doi: 10.1039/d2sd00217e.
- [29] M. El barghouti, O. Haidar, A. Akjouj, and A. Mir, “Figure of merit and sensitivity enhancement of biosensor LSPR in investigated for visible and near infrared,” *Photonics Nanostruct*, vol. 50, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.photonics.2022.101016.

- [30] Q. Duan, Y. Liu, S. Chang, H. Chen, and J. H. Chen, "Surface plasmonic sensors: Sensing mechanism and recent applications," *Sensors*, vol. 21, no. 16. MDPI AG, Aug. 02, 2021. doi: 10.3390/s21165262.
- [31] M. A. Jabin et al., "Surface Plasmon Resonance Based Titanium Coated Biosensor for Cancer Cell Detection," *IEEE Photonics J*, vol. 11, no. 4, 2019, doi: 10.1109/JPHOT.2019.2924825.
- [32] P. Sharma, P. Sharan, and P. Deshmukh, "A photonic crystal sensor for analysis and detection of cancer cells," 2015 International Conference on Pervasive Computing: Advance Communication Technology and Application for Society, ICPC 2015, vol. 2, no. 1, pp. 1–5, 2015, doi: 10.1109/PERVASIVE.2015.7087208.
- [33] P. Kumar, Rohan, V. Kumar, and J. S. Roy, "Dodecagonal photonic crystal fibers with negative dispersion and low confinement loss," *Optik (Stuttg)*, vol. 144, pp. 363–369, 2017, doi: 10.1016/j.ijleo.2017.06.131.
- [34] K. Ahmed, B. K. Paul, F. Ahmed, M. A. Jabin, and M. S. Uddin, "Numerical demonstration of triangular shaped photonic crystal fibre-based biosensor in the Terahertz range," *IET Optoelectronics*, vol. 15, no. 1, pp. 1–7, 2021, doi: 10.1049/ote2.12006.

Semiconducting Plant Extracts of *Cucurbita Pepo L.* Seeds for Facile, Inexpensive, Fully Solution-Processed, Transparent Photodetector Fabrication

Muzeyyen Savas¹, Beyza Bozkurt², Dilber Akcan³, Ruby Phul¹ , Talha Erdem^{1,*} , Zeliha Soran-Erdem^{3,4,*} 

¹Department of Electrical-Electronics Engineering, Abdullah Gül University, Kayseri 38080 Türkiye

²Department of Molecular Biology and Genetics, Abdullah Gül University, Kayseri 38080 Türkiye

³Bioengineering Program, Graduate School of Engineering and Science, Abdullah Gül University, Kayseri 38080 Türkiye

⁴Department of Engineering Sciences, Abdullah Gül University, Kayseri 38080 Türkiye

(Alınış / Received: 26.04.2024, Kabul / Accepted: 03.07.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.08.2024)

Keywords

Plant extract,
Pumpkin seed,
Cucurbita pepo L.,
Photodetectors.

Abstract: Solution-processable materials attract significant interest in the development of high-efficiency, cost-effective optoelectronic devices. However, widely used high-performance materials often suffer from high toxicity, low biocompatibility, and synthesis procedures hazardous to human health and the environment. As cost-effective, sustainable alternatives to the conventional solution-processed semiconductors, here we evaluate the potential of plant extracts. Within this framework, here we present photodetectors employing the extract of *Cucurbita pepo L.* (pumpkin) seeds. The extracted material exhibits a strong absorption peak in the UV region (~280 nm) and a weaker absorption band between 400-450 nm. Its fluorescence spectrum covers the blue-green region of the spectrum and possesses sharp and dominant peaks at 650 nm and 730 nm. For photodetector fabrication, we drop-cast the extract acting as the active material between two electric contacts formed by treating a conductive film of silver nanowires and zinc oxide nanoparticles using a surgical blade. The resulting device demonstrates a maximum responsivity of ~1.61 mA/W at 5 V bias voltage. Being fully solution-processed, transparent photodetectors, this proof-of-concept device employing plant extracts showcases a new material system in active optoelectronic devices as sustainable, inexpensive, and easy-to-handle alternatives to their conventional counterparts.

Kolay, Ucuz, Tamamen Çözeltiyle İşlenmiş ve Şeffaf Fotodetektör Üretimi için *Cucurbita Pepo L.* Tohumlarının Yarı İletken Bitki Özütleri

Anahtar Kelimeler

Bitki ekstraktı,
Balkabağı çekirdeği,
Cucurbita pepo L.,
Fotodetektör.

Öz: Çözeltide işlenebilen malzemeler, yüksek verimli ve uygun maliyetli optoelektronik cihazların geliştirilmesinde büyük ilgi görmektedir. Bununla birlikte, yaygın olarak kullanılan yüksek performanslı malzemeler sıklıkla yüksek toksisiteye, düşük biyouyumluluğa ve insan sağlığına ve çevreye zararlı sentez prosedürlerine sahiptir. Geleneksel, çözeltiyle işlenmiş yarı iletkenlere uygun maliyetli ve sürdürülebilir alternatifler olarak, sunulan çalışmada bitki ekstraktlarının potansiyeli araştırılmaktadır. Bu çerçevede, burada *Cucurbita pepo L.* (balkabağı) çekirdeği ekstraktı içeren fotodetektörler sunulmaktadır. Balkabağı çekirdeğinden elde edilen özütümüz, UV bölgesinde (~280 nm) güçlü bir soğurma gösterirken, 400-450 nm arasında daha zayıf bir soğurma bandına sahiptir. Özütün floresans spektrumu incelendiğinde, ışımının mavi-yeşil spektrum bölgesinde özellikle de 650 nm ve 730 nm'de keskin ve baskın tepe noktalarına sahip olduğu görülmektedir. Fotodetektör üretimi için, gümüş nanotellerden ve çinko oksit

nanopartiküllerinden oluşan iletken bir filmin cerrahi bir bıçak kullanılarak işlenmesiyle iki elektrik kontağı oluşturulmuş, daha sonra bu iki kontak arasına aktif malzeme görevi gören ekstrakt damlatılmıştır. Ortaya çıkan cihaz, 5 V öngerilim voltajında $\sim 1,61$ mA/W'lik maksimum yanıt vermiştir. Bu çalışmada ürettiğimiz tamamen çözeltiyle işlenmiş, şeffaf ve bitki özü içeren konsept ispatı fotodetektör cihazı, aktif optoelektronik cihazlarda geleneksel muadillerine göre sürdürülebilir, ucuz ve kullanımı kolay alternatif yeni bir malzeme sistemi olarak gelecek çalışmalara ışık tutacaktır.

*İlgili Yazar, email: zsoran@gmail.com

1. Introduction

Plants offer a vast array of bioactive compounds, such as flavonoids, alkaloids, carotenoids, saponins, and polyphenols, which are widely utilized in the food, pharmaceutical, and cosmetic industries for their antioxidant and antimicrobial properties [1], [2], [3], [4]. Another important property of some plant species is autofluorescence which stands for the ability of the plants to emit visible light upon excitation at a suitable wavelength [5]. Autofluorescence occurs owing to the presence of fluorescent, semiconducting pigments that are densely produced in plant tissues [6]. Considering their semiconducting and eco-friendly nature, plant-based compounds are promising alternatives to synthetic, non-biocompatible, and carcinogenic semiconductors. Owing to these strengths, such natural semiconductors promise improved eco-friendliness and biodegradability of optoelectronic devices. Nevertheless, despite their potential, these natural semiconductors currently remain underutilized in optoelectronic technologies.

As part of our attempts towards achieving more sustainable optoelectronic technologies, here we study pumpkin seed extracts. Pumpkins are members of the *Cucurbitaceae* family and the *Cucurbita* genus of gourd squashes, and they are commonly grown worldwide for both decorative and culinary applications [7]. Approximately 44% of their seeds consist of oil, with linoleic acid being the predominant fatty acid (42–59%) and oleic acid comprising 25% [7], [8]. Thanks to their high nutritional value and rich composition of essential fatty acids, vitamins, and minerals, pumpkin seed oil (PSO) has great potential for use as a functional food and edible oil [9]. Their fluorescence characteristics have also been studied in literature [7], [10]. For example, Borthakur and Barua [7] studied the relation between the fluorescence changes of *Cucurbita pepo L.* and the ripening stage of the fruit. According to their findings, the content of fluorophores in the fruit changes during growth, leading to variations in the fluorescence spectra of pumpkin seed extracts. However, to the best of our knowledge, the use of pumpkin seed extracts in optoelectronic devices remains unexplored.

Optoelectronic devices heavily rely on inorganic materials including silicon, germanium, or gallium-containing compounds (e.g., GaAsP, AlInGaN) that are expensive and environmentally hazardous to produce [11], [12]. Finding alternatives to these conventional materials has become crucial for making optoelectronics industry more sustainable. Solution-processed materials step forward as an important class of materials that eliminate the need for costly and energy-consuming growth methods. Perovskites [13], colloidal quantum dots (CQDs) [14], semiconducting organic molecules [15], and polymers [16] have been widely employed as active materials in these devices. However, the Cd content in the CQDs, the Pb content in the perovskites, and the toxic solvents such as dimethylformamide and dimethyl sulfoxide used during the synthesis of polymers substantially decrease the environmental compatibility of these solution-processed semiconducting materials. Therefore, environmentally-friendly alternatives are sought for achieving sustainable optoelectronics. At this point, semiconductors obtained from natural sources step forward. Since plant extracts like the pumpkin seed extract we employ in this work have a natural origin and are considered biodegradable, they are decomposable by natural processes without causing long-term environmental harm.

To make optoelectronic device fabrication more sustainable, optimization of materials is not enough. Instead, the whole fabrication system needs to comply with the principles of sustainable production. With this motivation, our team has recently presented a low-cost fabrication method for fully solution-processed, colloidal quantum dot (CQD) photodetectors [17], [18]. While the active material in these devices were Cd-based colloidal quantum dots, we employed a surgical blade to define the electrical contacts instead of using conventional lithography techniques [19], [20], [21], making the fabrication significantly cheaper and energy-efficient.

In this study, we further improve the sustainability of solution-processed photodetectors by introducing plant extracts for the first time as the active material of a photodetector instead of conventional environmentally harmful substances. To achieve this, we extracted the seeds of *Cucurbita pepo L.* which can absorb light over a broad wavelength range and emit orange-red light at around 630 nm and utilized its extract as the active material

in our proof-of-concept photodetector. Similar to our previous work [17], [18], we formed electric contacts by opening a 30 μm wide gap on a conductive film made of silver nanowires and zinc oxide nanoparticles. Subsequently, we completed the device structure by drop-casting the extract of the seeds of *Cucurbita pepo L.* between the electric contacts. The resulting proof-of-concept device exhibited responsivities up to 1.61 mA/W proving that simple, sustainable photodetectors can be produced using plant extracts. Considering that this is the first example of a photodetector relying on plant extracts, we believe that there is a substantial room for performance improvements through material and device optimization. With further improvements, we conceive that plant extracts will find applications in photodetectors as environmentally friendly, cost-effective, solution-processed semiconductors.

2. Material and Method

2.1 Chemicals and materials

Pumpkin seeds (*Cucurbita pepo*), n-hexane ($\geq 96\%$, Merck), Whatman qualitative filter papers, Syringe Filters PTFE Membrane 0.22 μm pore size (ISOLAB USA). Polyvinylpyrrolidone (PVP, $M_w \approx 40000$, powder), silver nitrate (AgNO_3 , 99.0%), sodium chloride (NaCl , 99.5%), potassium bromide (KBr , 99.0%), ethylene glycol (EG, 99.0%), ethanol absolute ($\geq 99.9\%$, Isolab), acetone (EMSURE, Merck), methanol ($\geq 99.7\%$, Sigma-Aldrich). Zinc acetate dihydrate ($\text{ZnAc}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 99.999%), dimethyl sulfoxide (DMSO, Merck), tetramethylammonium hydroxide pentahydrate (TMAH, $\geq 97\%$, Sigma-Aldrich), ethanol absolute ($\geq 99.9\%$, Isolab), acetone (EMSURE, Merck), n-hexane ($\geq 96\%$, Merck). *Cucurbita pepo* seeds were collected from a local grocery store, and all other chemicals and reagents were purchased from Sigma-Aldrich unless otherwise stated and used without further purification.

2.2 Preparation of pumpkin seed extract

Prior to extraction, pumpkin seeds were dried, peeled, and then ground using a mortar. Subsequently, 5 g of the ground pumpkin seeds were mixed with 25 mL of hexane, and the extraction was carried out in a 50 ml round bottom flask at 60 $^\circ\text{C}$ with continuous stirring and refluxing with nitrogen for 2 hours. Afterwards, the extract was allowed to cool to room temperature (RT) and was cleaned in three steps. For this purpose, first, the extract was filtered using a Whatman paper, and then the solution was centrifuged at 10,000 rpm for 10 min twice. Finally, the supernatant was filtered using an ISOLAB PTFE hydrophobic syringe filter with a 0.22 μm pore size, and the extract was stored at 4 $^\circ\text{C}$ until they were used in experiments.

2.3 Synthesis of silver nanowires

Silver nanowires were prepared using a polyol process, presented by Kim *et al.*, with some modifications [22]. Initially, 1.6 g of PVP was added to 50 mL of EG in a two-necked flat-bottom flask and stirred at 450 rpm using a magnetic stirrer until PVP was completely dissolved in EG. The mixture was then heated to 170 $^\circ\text{C}$, and 0.05 g of NaCl , 0.025 g of KBr , and 0.7 g of AgNO_3 were added to the solution as soon as it reached 170 $^\circ\text{C}$ and conserved stirring. Next, the solution was kept at 170 $^\circ\text{C}$ for 3 h to allow the Ag nanowire growth reaction to take place and then was cooled down to room temperature by moving the flask into a water bath. To clean, the nanowire solution was centrifuged with methanol and acetone twice. The collected Ag NWs were finally dispersed in ethanol according to the desired concentration.

2.4 Synthesis of zinc oxide nanoparticles

ZnO nanoparticles were synthesized using the modified sol-gel method developed by Jin *et al.* [23] Two different solutions were prepared for the synthesis. For the first solution, 30 mL of dimethyl sulfoxide (DMSO) was used to dissolve 0.6585 g of zinc acetate dihydrate. The solution was then left to stir. Second, a tetramethylammonium hydroxide pentahydrate (TMAH) solution in ethanol was prepared (0.5 M, 10 mL). The TMAH solution was added to the zinc acetate dihydrate solution at a rate of 8 mL/min while stirring. Then, without pausing the mixing process, the solutions were allowed to react for an hour under ambient conditions. After the reaction was completed, the resulting solution was equally divided into three 50 mL falcon tubes, which were then filled with acetone [24], and the content was centrifuged for 5 minutes at 5000 rpm. The precipitate was preserved once this process was finished, and the supernatant was poured out. Each falcon tube was then filled with 1 mL of ethanol and sonicated in a cold sonicator for 10 minutes. Subsequently, each 1 mL solution was mixed with 24 mL of acetone and 25 mL of hexane, and the solutions were centrifuged at 5000 rpm for 10 min. Similarly, the liquid portion of the falcon had been drained after the centrifugation process, and 1.5 mL of ethanol was added. Before further use, they were sonicated for 15 minutes in a cooled sonicator.

2.5 Fabrication of the photodetector

To prepare photodetectors with PSE, Ag NW and ZnO NP loadings were fixed at 2 mg mL^{-1} and 5 mg mL^{-1} , respectively. The fabrication process starts with cleaning 2.5x2.5 cm^2 glass substrates. The substrates were initially cleaned in an ultrasonic bath with isopropanol for 7 min. After drying with N_2 , the glass substrates were

treated in a Harrick Plasma Expanded Plasma Cleaner System for another 7 min for further cleaning. The Ag NWs were spun at 2000 rpm for 60 s. This deposition procedure was repeated 10 times to obtain a conductive and transparent film and then the substrate was annealed at 150 °C for 15 min. ZnO NPs were spin-coated at 1000 rpm for 30 s onto the resultant substrate and annealed at 150 °C for 20 min. To deposit PSE between the Ag NW electrodes, a gap was opened by mechanically scratching the Ag NW-ZnO film using a surgical blade that had been heated using the tip of a soldering iron prior to scratching. Finally, the semiconducting purified PSE was drop-casted onto this gap and annealed at 60 °C for 15 min. The whole fabrication was carried out under ambient air conditions.

2.6 Optical characterizations

To measure the absorbance spectrum of the synthesized materials, a Thermo Genesys 10S UV-vis spectrophotometer was utilized. The absorption spectrum of PSE was obtained between 200-700 nm wavelengths with an interval of 1 nm. The samples were added to the hexane-filled quartz cuvettes and absorbance data was collected in arbitrary units (a.u.). The absorbance spectra of silver nanowires and zinc oxide nanoparticles were measured between 400-700 nm wavelengths with an interval of 1 nm. The samples were added to the ethanol-filled quartz cuvettes and absorbance data was collected in arbitrary units (a.u.). The photoluminescence (PL) spectrum of PSE was measured by Agilent-Cary Eclipse fluorescence spectrophotometer 400-700 nm range with an interval of 1 nm wavelengths. The samples were added to the hexane-filled quartz cuvettes, and photoluminescence intensity data was collected in arbitrary units (a.u.).

2.7 Structural characterizations

The surface morphology of the silver nanowires (Ag NW)-zinc oxide nanoparticles (ZnO NP) films was imaged by Zeiss Gemini scanning electron microscope (SEM) and Zeiss Axiocam 506 color optical microscope. Obtained images were characterized using Image J program. The thickness of the films was measured by using a Bruker Dektak XT stylus profilometer. Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy analyses of pumpkin seed extract was measured by Thermo Scientific Nicolet 6700 FT-IR Spectroscopy.

2.8 Electrical characterizations

Electrical conductivity of the Ag NW-ZnO NP films was determined by measuring sheet resistance of these Ag NW-ZnO NP films, using a handmade four-point probe. For each sample, the average sheet resistance value was determined by measuring five different points. Current-voltage (I-V) measurements were taken using a Keithley 2400 source meter illuminated by hand-held lasers with different wavelengths and monitored the current by using a software. The photocurrent (I_{ph}) is determined by subtracting the dark current (I_{dark}) from the total measured current (I_{total}). The equation used is: $I_{ph}=I_{total}-I_{dark}$ where I_{total} is the current measured when the photodetector is illuminated, and I_{dark} is the current measured in the absence of light. The responsivity of the fabricated photodetectors was measured by the responsivity measurement setup (Keithley 2400 source meter) irradiated by a monochromator-equipped broadband light source was used to measure current-voltage and responsivity of fabricated photodetectors. While measuring the photocurrent under irradiation at various wavelengths between 400 and 650 nm, which are generated with the help of a white light source and a monochromator, a bias voltage is applied to the photodetector.

3. Results and Discussion

Fabrication of optoelectronic devices following simplified processes and employing environmentally friendly materials can lead to a more sustainable and cost-effective technology. Within this framework, pumpkin seeds have a great potential for use in optoelectronics owing to the semiconducting character of their extracts.

In this regard, here we present a new device employing the extracts of *Cucurbita pepo* L. seeds as the active material in a fully solution-processed, transparent metal-semiconductor-metal photodetector architecture. We first prepared the extracts of the pumpkin seeds in hexane with continuous stirring at 60 °C under argon reflux. Following the cleaning procedure, we obtained a clear and greenish oily liquid under daylight and a red-emitting liquid under ultraviolet (UV) light (**Figure 1a**). The concentration of the final material turned out to be 182 mg/mL. We conducted absorbance and photoluminescence measurements to characterize the optical features of pumpkin seed extracts (PSE). PSE absorbs light at a broad range of wavelengths between 200-650 nm and emits a red light under UV excitation, mainly due to the presence of riboflavin and protochlorophylls in pumpkin seeds (Borthakur and Barua, 2014) [7]. As observed in Figure 1a, PSE has a strong absorption peak between 250-300 nm and much weaker absorption bands around 410-450 nm and 550-650 nm. When excited at a wavelength of 420 nm, PSE possesses a weak, broad blue emission in addition to strong emission peaks at ~650 and ~730 nm (**Figure 1b**). We measured the fluorescence quantum yield of the extract as 21%. Following optical characterizations, we conducted FT-IR measurements within a range of 4000-500 cm^{-1} to identify the chemical groups of the active components found in our extract (**Figure 1c**). Previously, *Berezin and V. V. Nechaev* reported that Pumpkin Seeds primarily contain triacylglycerols, along with phenolics and tocopherol in trace amounts [25]. Similar to that study,

our analysis confirmed the presence of hydroxyl groups (O-H) between $3450\text{-}3250\text{ cm}^{-1}$, likely originating from carbohydrates or other bioactive compounds such as carboxyl acids and ketones. We also observed a peak around $3120\text{-}3030\text{ cm}^{-1}$ representing the presence of N-H groups found in amide compounds, as well as the bands at $1105\text{-}1010\text{ cm}^{-1}$ corresponding to lipids, and $2950\text{-}2850\text{ cm}^{-1}$ corresponding to C-H vibrations. Finally, the vibrations around 1450 cm^{-1} suggest the anti-symmetric deformation of CH_3 and CH_2 groups [26].

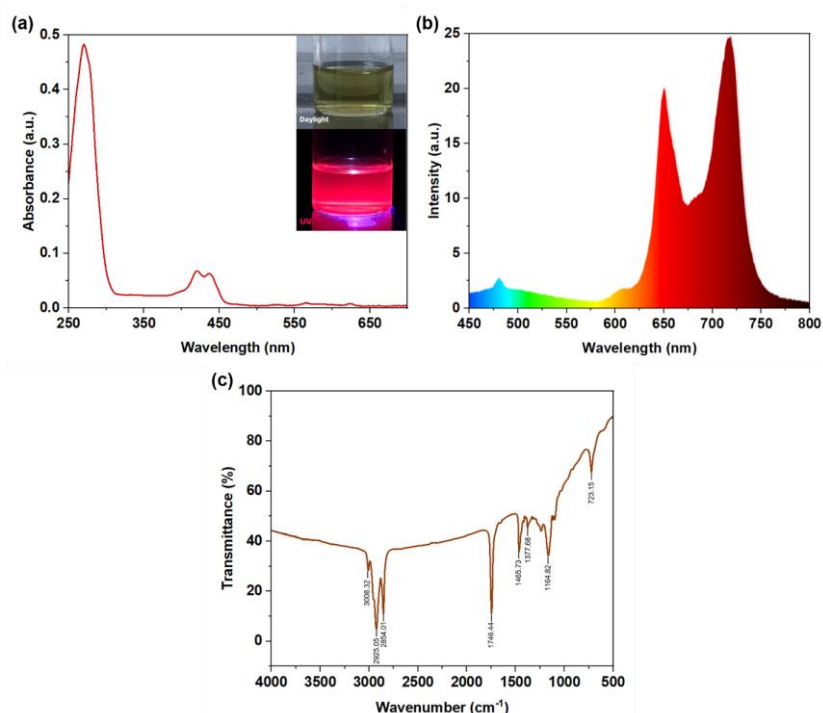


Figure 1. (a) The absorbance spectrum of the PSE. Inset pictures show the photos of the PSE under daylight (above), where the extract reveals a light green color, and under excitation with ultraviolet light (bottom), where the extract has a red emission. (b) The photoluminescence spectrum of the PSE when excited at 420 nm. (c) FT-IR transmittance spectrum of PSE.

Following the optical characterizations of PSE, we carried out the fabrication of an environmentally friendly and cost-effective photodetector. Initially, we implemented the techniques described in our previous publications [17], [18] for the electrode preparation process. Instead of conventional methods involving metal evaporation and lithography, we preferred employing silver nanowires (Ag NW) and zinc oxide nanoparticles (ZnO NP). The silver nanowires synthesized following the procedures reported in Reference [22] exhibited absorption maxima at 350 and 380 nm, corresponding to the longitudinal and transverse modes of plasmon peaks, respectively (**Figure S1**). These findings align with the observations reported by Meenakshi *et al.* [22], [27], [28]. The synthesized Ag NWs were characterized by using scanning electron microscopy (SEM) and Image J software. The SEM images revealed that the Ag NWs possess an average length exceeding $5\ \mu\text{m} \pm 1.08\ \mu\text{m}$ (**Figure S2 (a)**) and an average diameter of approximately $42\ \text{nm} \pm 4.46\ \text{nm}$ (**Figure S2 (b)**).

Since ZnO NPs were found to enhance the stability and conductivity of the films of silver nanostructures [29], we synthesized ZnO NPs using the recipe adapted from Jin *et al.* [23] The absorbance spectrum presented in **Figure S3** indicated a peak at a wavelength of 350 nm, which can be attributed to the intrinsic band-gap absorption of zinc oxides [30], [31], [32]. Subsequently, Dynamic light scattering (DLS) measurements were performed on the ZnO NPs to investigate structural properties of the ZnO nanoparticles (NPs), and the results indicated a particle size of 12 nm. This observation suggests that the NPs possess the potential to occupy the gaps existing between the nanowires, thereby leading to an improvement in conductivity. Supplementary information, **Figure S4**, provides a visual representation of this phenomenon.

To fabricate the proof-of-concept device, we spin-coated Ag NW (10 layers) onto a pre-cleaned glass substrate and annealed it (**Figure 2a**). Afterwards, we spin-coated zinc oxide nanoparticles (ZnO NP) on top of the Ag NW films (**Figure 2b**) to increase the electrical conductivity, transparency and adhesion of the film [17], [33]. To investigate how the number of Ag NW layers affects transparency, we performed multiple spin-coating cycles of the Ag NW solution, followed by five spin-coating cycles of the ZnO NP dispersion. As depicted in **Figure S5**, the transmittance of the Ag NW-ZnO NP films decreases as the number of spin-coating cycles increases. However, even after two spin-coating cycles, the transmittance remains above 90%. Even after ten spin-coating cycles, the transmittance is still higher than 85% in the spectral range over 580 nm. In comparison, commercially available indium tin oxide

films (ITO) have transmittances of around 90% in the visible range [34]. These results indicate that the levels of transparency we achieved are similar to what has been reported in the literature [35]. Afterward, we examined the sheet resistance of the 10 layers of Ag NW-coated film. Characterizations conducted by a four-probe measurement set-up demonstrated that the sheet resistance of the Ag NW/ZnO NP transparent film is 154 ohms/square. When we compare this sheet resistance with commercially available ITO, we realized that with the same thickness of 165 nm, our conductive film has slightly higher sheet resistance (154 ohms/square) than ITO (60-90 ohms/square) [36], [37], [38], [39]. Therefore, this result shows that the levels of sheet resistance we obtained are comparable with the transparent conductive films in the literature. Then, we scratched this layer with a surgical blade and drop-casted the semiconductive plant-based solution into the resulting gap as the active layer (**Figure 2c**). Subsequently, we annealed the device at 60 °C for 15 min. The actual image of our photodetector is shown in **Figure 2d**. To examine potential chemical alterations in the Pumpkin Seed extract following thermal treatment at 60°C, we conducted FTIR analysis. The results indicated no significant changes in the structure of the PSE concerning the locations of vibrations (**Figure S6**).

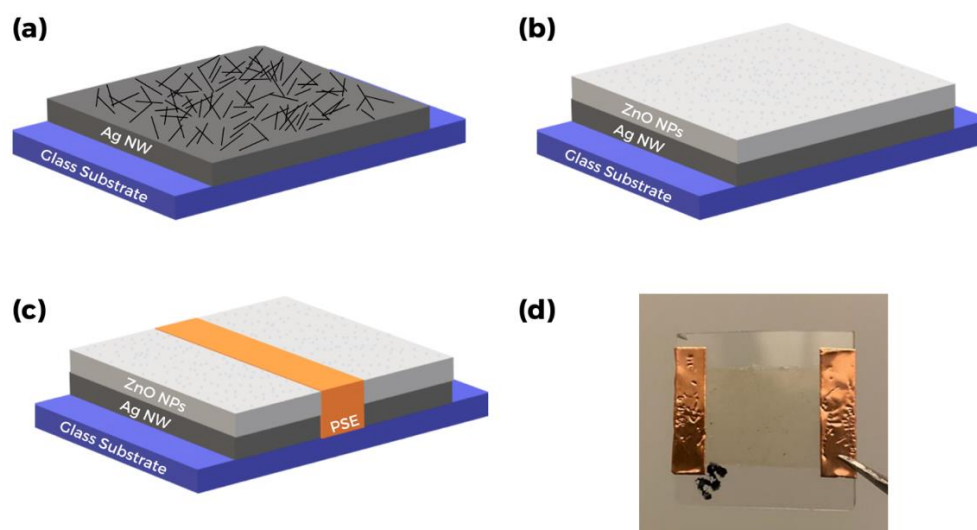


Figure 2. (a-c) Schematic representation of the metal-semiconductor-metal PSE photodetector fabrication procedure. (d) Photograph of the fabricated device.

The structure of the scratched surface prior to PSE deposition was characterized using both optical microscopy and SEM (Figure 3). Results reveal the width of the gap as $\sim 30\ \mu\text{m}$, which is wider than the typical gaps opened using lithography but narrow enough to observe variations in the resistance upon exposure to light [17], [18]. Profilometer measurements indicate the thickness of Ag NW-ZnO NP film to be $\sim 165\ \text{nm}$; the film thickness was measured as $\sim 22\ \mu\text{m}$ after drop-casting PSE on top of the Ag NW and ZnO coated film (**Figure S7**).

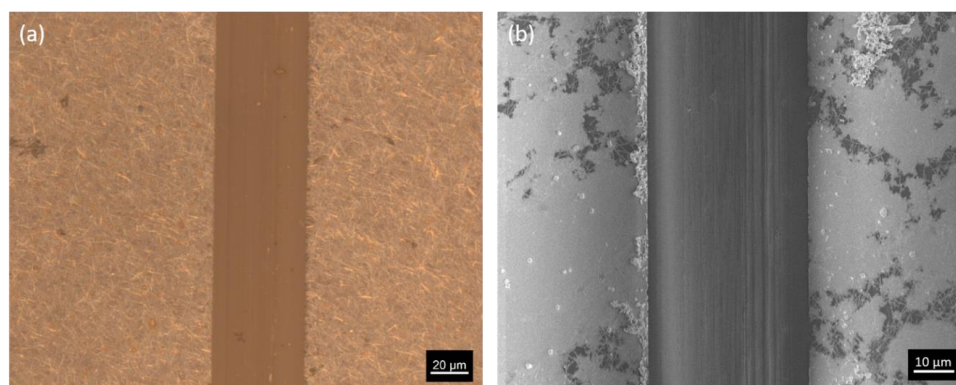


Figure 3. (a) Optical microscope and (b) SEM images of Ag NW-ZnO NP electrodes after scratching with a surgical blade.

After the fabrication of the photodetectors (PDs), optoelectronic characterizations were conducted to quantitatively assess their performance. For this aim, photocurrent measurements were performed on the

fabricated PDs by exciting the pumpkin seed extract (PSE) at different wavelengths and bias voltages. Additionally, responsivity calculations were carried out, which is a metric that characterizes the ability of the photodetector to convert light into electricity and calculated according to Equation 1 [40] where I_{ph} and P_o stand for the photocurrent and incident optical power, respectively [41].

$$R_{\lambda} = \frac{I_{ph}}{P_o} \quad (\text{A/W}) \quad (1)$$

As shown in **Figure 4a**, the applied bias and wavelength of the incident light significantly affect the responsivity of the fabricated photodetectors. The maximum responsivity recorded was measured as ~ 1.61 mA/W at 5 V bias voltage under 620 nm light exposure. With increasing voltage, the stronger electric field between the electrodes makes it simpler to collect charges which enhances the photocurrent and responsivity. On the hand, the recorded, relatively low responsivity can be attributed to the PSE extract that did not fully dry due to the oily nature of the extract even after treating it at 60 °C. When we compare this wavelength dependence with the absorbance of the PSE, we observe that the responsivity decreases at shorter wavelengths, whereas the absorbance of PSE increases. This demonstrates that the contacts cannot collect the generated electron-hole pairs as effectively as the ones generated at longer wavelength exposures. We attribute the observed difference to the thickness of the PSE layer, which is approximately 22 micrometers due to the drop-casting method, in combination with the not fully-dried film causing exciton formation far away from the contacts upon excitation with short-wavelength photons. Since the PSE absorbs light at shorter wavelengths stronger than light at longer wavelengths, light at shorter wavelengths has a substantially smaller penetration depth. Therefore, the highly energetic photons are only absorbed in the first few microns of the top portion of the device and are unable to reach the active region to be harvested, reducing the responsivity of the photodetector. When these results are compared with the quantum dot-based photodetectors and organic photodetectors, still our plant-based photodetector needs improvement in their responsivities. This performance difference results from the broader absorption spectra that QDs have, making them more efficient at absorbing specific wavelengths of light. Quantum dots also tend to exhibit a higher quantum efficiency, representing the proportion of absorbed photons that contribute to photocurrent by generating charge carriers.

When these results are compared with the quantum dot-based photodetectors and organic photodetectors [42], [43], [44], [45], [46], our plant-based photodetector still requires enhancement in its responsivity. Quantum dot-based photodetectors typically exhibit responsivities in the range of 0.1 to 1 A/W, with some advanced devices reaching up to 109 A/W depending on the specific material and device architecture [47]. Organic photodetectors, on the other hand, usually show responsivities between 0.1 and 0.5 A/W [48]. In comparison, our plant-based photodetector currently demonstrates a responsivity of ~ 1.61 mA/W at 5 V bias voltage under 620 nm light exposure. While this is lower than the typical values for QD and organic photodetectors, it is important to note that this is a preliminary result, and there is significant potential for improvement through further optimization of the device structure and material properties. This performance disparity is attributed to the broader absorption spectrum inherent to quantum dots, which enables them to absorb specific wavelengths of light more efficiently. Additionally, quantum dots tend to demonstrate higher quantum efficiency, reflecting a greater proportion of absorbed photons contributing to photocurrent by generating charge carriers [49], [50]. As a result, quantum dot photodetectors generally offer superior responsivity compared to their organic counterparts.

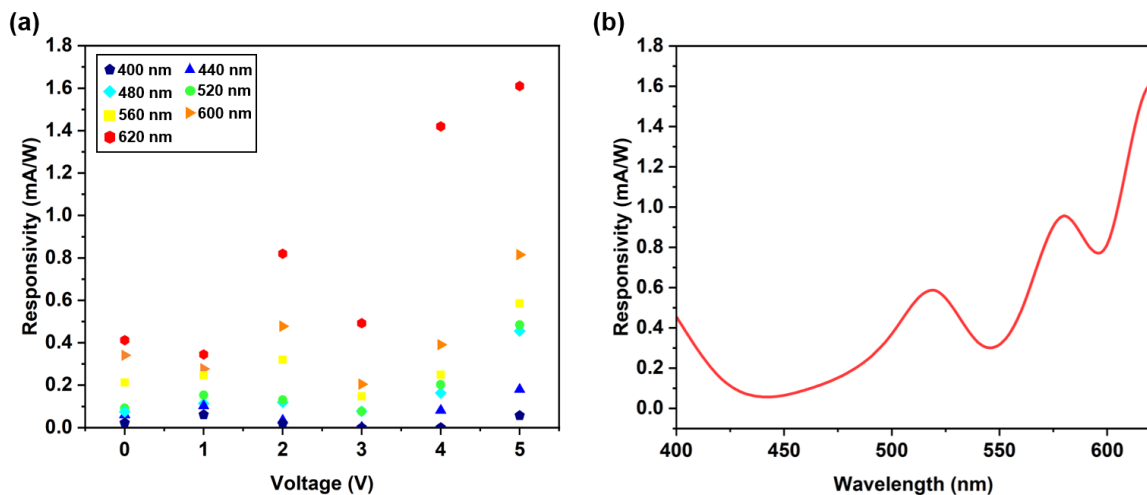


Figure 4. (a) The responsivity of the PSE photodetectors at different bias voltages in the range of 400-620 nm. (b) The responsivity spectrum of PSE photodetectors at a bias voltage of 5 V as a function of wavelength.

4. Discussion and Conclusion

Here, we introduced semiconducting plant extracts as a sustainable alternative to conventional semiconductor materials for optoelectronic applications. In particular, we demonstrated the potential of plant extracts in metal-semiconductor-metal photodetectors using the extract of *Cucurbita pepo L.* (pumpkin) seeds. To further elaborate the environmental-friendliness, we employed solution-processed electric contacts made of Ag nanowires and ZnO nanoparticles patterned using a surgical blade instead of lithography. The resulting conductive films exhibited a sheet resistance <100 ohms/square while keeping the optical transparency above 85%. By simply drop-casting the extract between the electrodes, we completed the photodetector structure. To the best of our knowledge, our device is the first active optoelectronic device made of plant extracts. Our proof-of-concept device exhibited responsivities up to 1.61 mA/W. Through thickness, material, and device architecture optimizations, the performance of the device can be further enhanced such that it can compete with the materials used ubiquitously in literature. We believe that our results potentially form the building blocks for realizing a more sustainable and cost-effective material system to be employed in active optoelectronic devices.

Acknowledgment

ZSE acknowledges to The Scientific and Technological Research Council of Türkiye (TUBİTAK) ARDEB 1001 Grant No:123M876. TE acknowledges the BAGEP Award from the Science Academy and the GEBIP Award from the Turkish Academy of Sciences (TÜBA).

References

- [1] Proestos, C., & Varzakas, T. 2017. Aromatic Plants: Antioxidant Capacity and Polyphenol Characterisation. *Foods*, 6(4), 1–7.
- [2] Demmig-Adams, B., Gilmore, A. M., & W. W. A. Iii. 1996. Carotenoids 3: in vivo function of carotenoids in higher plants. *FASEB J*, 10(4), 403–412.
- [3] Langi, P., Kiokias, S., Varzakas, T., & Proestos, C. 2018. Carotenoids: From Plants to Food and Feed Industries. *Methods in Molecular Biology*, 1852, 57–71.
- [4] Proestos, C. 2020. The Benefits of Plant Extracts for Human Health. *Foods*, 9(11), 1653.
- [5] Croce, A. C., & Bottiroli, G. 2014. Autofluorescence spectroscopy and imaging: A tool for biomedical research and diagnosis. *European Journal of Histochemistry*, 58(4), 320–337.
- [6] Donaldson, L. 2020. Autofluorescence in plants. *Molecules*, 25(10).
- [7] Borthakur, P. R., & Barua, A. G. 2014. Fluorescence studies of the seeds of the pumpkin (*Cucurbita pepo L.*). *National Academy Science Letters*, 37(3), 275–279.
- [8] Nawirska-Olszańska, A., Kita, A., Biesiada, A., Sokół-Łętowska, A., & Kucharska, A. Z. 2013. Characteristics of antioxidant activity and composition of pumpkin seed oils in 12 cultivars. *Food Chemistry*, 139(1–4), 155–161
- [9] Šamec, D., et al. 2022. The potential of pumpkin seed oil as a functional food-A comprehensive review of chemical composition, health benefits, and safety. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(5), 4422–4446.
- [10] Liu, Y., Lininger, A. S., McCaskey, L. N., & Thomas, R. M. 2023. Separation of fluorescent protochlorophyllide from green pumpkin seed using column chromatography. *Journal of Chemical Education*, 100(1), 312–315.
- [11] Barberini, L., Cadeddu, S., Giannattasio, A., & Lai, A. 2002. Gallium arsenide photodetectors for imaging in the far ultraviolet region. *Applied Physics Letters*.

- [12] Song, J., et al. 2021. High-efficiency and high-speed germanium photodetector enabled by multiresonant photonic crystal. *Nanophotonics*, 10(3), 1081–1087.
- [13] Dou, L., et al. 2014. Solution-processed hybrid perovskite photodetectors with high detectivity. *Nature Communications*, 5(1), 1–6.
- [14] Biondi, M., et al. 2021. Facet-Oriented Coupling Enables Fast and Sensitive Colloidal Quantum Dot Photodetectors. *Advanced Materials*, 33(33), 2101056.
- [15] Chow, P. C. Y., Someya, T., Chow, P. C. Y., & Someya, T. 2020. Organic Photodetectors for Next-Generation Wearable Electronics. *Advanced Materials*, 32(15), 1902045.
- [16] Wu, Z., Zhai, Y., Kim, H., Azoulay, J. D., & Ng, T. N. 2018. Emerging Design and Characterization Guidelines for Polymer-Based Infrared Photodetectors. *Accounts of Chemical Research*, 51(12), 3144–3153.
- [17] Savas, M., Yazici, A. F., Arslan, A., Mutlugün, E., & Erdem, T. 2023. Toward sustainable optoelectronics: solution-processed quantum dot photodetector fabrication using a surgical blade. *Optics Express*, 62(2), 027102.
- [18] Savas, M., Yazici, A. F., Arslan, A., Mutlugün, E., & Erdem, T. 2022. Simple, sustainable fabrication of fully solution-processed, transparent, metal-semiconductor-metal photodetectors using a surgical blade as an alternative to conventional tools. *Proceedings of SPIE*, 12131, 181–193.
- [19] Das, N., Karar, A., Vasiliev, M., Tan, C. L., Alameh, K., & Lee, Y. T. 2011. Analysis of nano-grating-assisted light absorption enhancement in metal–semiconductor–metal photodetectors patterned using focused ion-beam lithography. *Optics Communications*, 284(6), 1694–1700.
- [20] Qin, L., Shing, C., & Sawyer, S. 2011. Metal semiconductor metal ultraviolet photodetectors based on zinc-oxide colloidal nanoparticles. *IEEE Electron Device Letters*, 32(1), 51–53.
- [21] Chou, S. Y. 1999. Nanoscale GaAs metal-semiconductor-metal photodetectors fabricated using nanoimprint lithography. *Applied Physics Letters*.
- [22] Kim, T., Canlier, A., Kim, G. H., Choi, J., Park, M., & Han, S. M. 2013. Electrostatic spray deposition of highly transparent silver nanowire electrode on flexible substrate. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 5(3), 788–794.
- [23] Jin, X., et al. 2018. Bright alloy type-II quantum dots and their application to light-emitting diodes. *Journal of Colloid and Interface Science*, 510, 376–383.
- [24] Alexandrov, A., [et al.]. 2020. Al-, Ga-, Mg-, or Li-doped zinc oxide nanoparticles as electron transport layers for quantum dot light-emitting diodes. *Scientific Reports*, 10(1), 1–11.
- [25] Berezin, K. V., & Nechaev, V. V. 2005. Calculation of the IR spectrum and the molecular structure of β -carotene. *Journal of Applied Spectroscopy*, 72(2), 164–171.
- [26] Schlücker, S., Szeghalmi, A., Schmitt, M., Popp, J., & Kiefer, W. 2003. Density functional and vibrational spectroscopic analysis of β -carotene. *Journal of Raman Spectroscopy*, 34(6), 413–419.
- [27] Ghorbani, M. M., & Taherian, R. 2018. Methods of measuring electrical properties of material. In *Electrical Conductivity in Polymer-Based Composites: Experiments, Modelling, and Applications*, 365–394.
- [28] Meenakshi, P., Karthick, R., Selvaraj, M., & Ramu, S. 2014. Investigations on reduced graphene oxide film embedded with silver nanowire as a transparent conducting electrode. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 128, 264–269.
- [29] Tang, Y., et al. 2018. Low-temperature solution processed flexible silver nanowires/ZnO composite electrode with enhanced performance and stability. *Journal of Alloys and Compounds*, 747, 659–665.

- [30] Khorsand Zak, A., Razali, R., Abd Majid, W. H., & Darroudi, M. 2011. Synthesis and characterization of a narrow size distribution of zinc oxide nanoparticles. *International Journal of Nanomedicine*, 6(1), 1399–1403.
- [31] Singh, D. K., Pandey, D. K., Yadav, R. R., & Singh, D. 2012. A study of nanosized zinc oxide and its nanofluid. *Pramana - Journal of Physics*, 78(5), 759–766.
- [32] Aldalbahi, A., et al. 2020. Greener synthesis of zinc oxide nanoparticles: Characterization and multifaceted applications. *Molecules*, 25(18).
- [33] Alam, F., & Balani, K. 2017. Role of silver/zinc oxide in affecting de-adhesion strength of *Staphylococcus aureus* on polymer biocomposites. *Materials Science and Engineering C: Materials for Biological Applications*, 75, 1106–1114.
- [34] Zhang, J., Chia, A. C. E., & Lapierre, R. R. 2014. Low resistance indium tin oxide contact to n-GaAs nanowires. *Semiconductor Science and Technology*, 29(5), 054002.
- [35] Ahmed, N. M., Sabah, F. A., Abdulgafour, H. I., Alsadig, A., Sulieman, A., & Alkhoaryef, M. 2019. The effect of post annealing temperature on grain size of indium-tin-oxide for optical and electrical properties improvement. *Results in Physics*, 13.
- [36] Kang, S. W., Lee, H. J., Cho, S. H., Cheong, W. S., Lee, G. H., & Song, P. K. 2012. Effects of Sn concentration on ultrathin ITO films deposited using DC magnetron sputtering. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 7(5), 494–497.
- [37] Kitova, S., Mankov, V., Dimov, D., Strijkova, V., Malinowski, N. 2021. High quality ITO thin films for application as conductive transparent electrodes." *Bulgarian Chemical Communications* 48, 196–201.
- [38] Hussain, S. Q., et al. 2014. RF magnetron sputtered ITO:Zr thin films for the high efficiency a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells. *Metals and Materials International*, 20(3), 565–569.
- [39] Mazur, M., Kaczmarek, D., Domaradzki, J., Wojcieszak, D., Song, S., & Placido, F. 2010. Influence of thickness on transparency and sheet resistance of ITO thin films. In *The Eighth International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems*, 65–68.
- [40] Xu, K., Zhou, W., Ning, Z., Xu, K., Zhou, W., & Ning, Z. 2020. Integrated structure and device engineering for high performance and scalable quantum dot infrared photodetectors. *Small*, 16(47), 2003397.
- [41] Hui, R., & O'Sullivan, M. 2009. *Fiber Optic Measurement Techniques*. Fiber Optic Measurement Techniques.
- [42] Pu, K., et al. 2023. A flexible sensitive visible-NIR organic photodetector with high durability. *Advanced Materials Technologies*, 8(16), 2300207.
- [43] Kielar, M., Dhez, O., Pecastaings, G., Curutchet, A., & Hirsch, L. 2016. Long-term stable organic photodetectors with ultra-low dark currents for high detectivity applications. *Scientific Reports*, 6(1), 1–11.
- [44] Dang, Q., et al. 2023. Enhanced gain in organic photodetectors using the polymer with singlet open-shell ground state. *Angewandte Chemie*, e202312538.
- [45] Liu, Q., et al. 2019. Hybrid Graphene/Cu₂O Quantum Dot Photodetectors with Ultrahigh Responsivity. *Advanced Optical Materials*, 7(20), 1900455.
- [46] Wu, X., Zhao, B., Zhang, J., Xu, H., Xu, K., & Chen, G. 2019. Photoluminescence and Photodetecting Properties of the Hydrothermally Synthesized Nitrogen-Doped Carbon Quantum Dots. *Journal of Physical Chemistry C*, 123(42), 25570–25578.
- [47] Kwak, D. H., Ramasamy, P., Lee, Y. S., Jeong, M. H., Lee, J. S. 2019. High-Performance Hybrid InP QDs/Black Phosphorus Photodetector. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 11(32), 29041–29046.

- [48] Ren, H., Chen, J. D., Li, Y. Q., Tang, J. X. 2021. Recent Progress in Organic Photodetectors and their Applications. *Advanced Science*, 8(1).
- [49] Hu, L., [et al.]. 2014. Multifunctional carbon dots with high quantum yield for imaging and gene delivery. *Carbon N Y*, 67, 508–513.
- [50] Nasilowski, M., [et al.]. 2015. Gradient CdSe/CdS Quantum Dots with Room Temperature Biexciton Unity Quantum Yield. *Nano Lett*, 15(6), 3953–3958.

Benchmarking Deep Learning Models for Dermatological Image Analysis: EfficientNet Takes the Lead

Rukiye Nur Kaçmaz*¹, Refika Sultan Doğan²,

*¹Erciyes University Faculty of Engineering Software Engineering, KAYSERİ

²Abdullah Gül University, Faculty of Life and Natural Sciences, Bioengineering, KAYSERİ,

(Alınış / Received: 31.07.2024, Kabul / Accepted: 26.08.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.08.2024)

Anahtar Kelimeler
Deri Kanseri,
Transfer Öğrenme,
Ablasyon

Öz: Hızlı yayılan ve ölümcül olan cilt kanserine melanom denir. Cilt kanserinin erken evrelerinde tedavi edilmezse ölüm oranı çok yüksektir ancak erken evrelerinde doğru bir şekilde tanımlandığında hastaların hayatları kurtarılabilir. Doğru ve hızlı bir teşhis ile hastanın hayatta kalma şansı artabilir. Bilgisayar destekli bir tanı destek sisteminin oluşturulmasını gerekir.. Bu çalışmada Dense201, DarkNet19, EfficientNet melanom sınıflandırması için 3 farklı derin transfer öğrenme modeli sunulmaktadır. Buna ek olarak, transfer öğrenmesinde kullanılan filtre boyutu açısından ablasyon çalışması yapılmıştır. Filtre boyutunun etkisine bakmak için her bir modelde farklı sayıda filtre boyutu oluşturulup sonuç alınmıştır. Çalışmada 1792 iyi huylu ve 1464 kötü huylu görüntü içeren ISIC veri seti kullanılmıştır. Bu çalışmaya göre, DenseNet201, boyutlarına bakılmaksızın farklı filtre boyutlarında doğru ve güvenilir sonuçlar sağlamıştır. Bu nedenle, cilt lezyonlarının sınıflandırılmasını içeren çalışmalarda DenseNet201 kullanımının seçilmesi önerilir.

Dermatolojik Görüntü Analizi için Derin Öğrenme Modellerinin Karşılaştırılması: EfficientNet Zirvede

Keywords
Skin Cancer,
Transfer Learning,
Ablation

Abstract: Skin cancer that spreads quickly and is deadly is called melanoma. If skin cancer is not treated in its early stages, the mortality rate is very high, but when it is correctly identified in its early stages, patients' lives can be saved. With an accurate and fast diagnosis, the patient's chance of survival can be increased. A computer-aided diagnostic support system needs to be created. In this study, Dense201, DarkNet19, and EfficientNet offer 3 different deep transfer learning models for melanoma classification. In addition, an ablation study was conducted in terms of the filter size used in transfer learning. To look at the effect of the filter size, different filter sizes were created in each model and the results were obtained. The ISIC dataset containing 1792 benign and 1464 malignant images was used in the study. According to this study, DenseNet201 provided accurate and reliable results at different filter sizes regardless of their size. Therefore, it is recommended to use DenseNet201 in studies involving the classification of skin lesions.

*İlgili Yazar, email: rukiye kacmaz@erciyes.edu.tr

1. Introduction

Melanoma is the least common but most deadly type of skin cancer, accounting for only 1% of all skin cancer cases. It is estimated that 200,340 cases of melanoma will be diagnosed in the United States in 2024 [1]. Of these cases, 99,700 will be noninvasive (in situ) and 100,640 will be invasive. Of these invasive cases, 59,170 will be in men and 41,470 in women. It is estimated that 8,290 deaths from melanoma will occur, 5,430 in men and 2,860 in women. Melanoma is associated with UV exposure, especially during adolescence, such as sunburn and indoor tanning [2]. People with fair skin and those with lighter eyes and skin tones are at higher risk. The incidence of melanoma has been steadily increasing in recent years. The number of new invasive melanoma diagnoses per year has increased by 46% in the last 15 years, 32% in the last 10 years, and 16% in the last 5 years [3]. The incidence of melanoma varies by age. It is higher in women before the age of 50, twice as high in men as in women after the age of 65, and three times as high in women at the age of 80 [4], [5]. In young adults, especially those between the ages of 15 and 29, melanoma is the second most common cancer. Pediatric melanoma is rare and is usually due to different causes, such as large, hairy moles present at birth [6]. The relationship between UV exposure and melanoma is well established. Even one severe sunburn during childhood or adolescence doubles the risk of developing melanoma later in life [7]. The use of indoor tanning devices is also a significant risk factor, and the risk increases significantly in those who use these devices before the age of 35 [6], [8]. Indoor tanning is more common among women, and this habit significantly increases the risk of melanoma [9].

Melanoma is usually diagnosed by biopsy. Dermoscopy and other imaging techniques are used to evaluate lesions. Pathologic examination provides information about tumor thickness and other prognostic factors [10]. Accurate staging of melanoma is vital to determining appropriate treatment strategies [11]. An exhaustive analysis emphasizes the potential of artificial intelligence (AI) in the field of dermatology for the early diagnosis of skin cancer [12], [13]. The study highlights the importance of validating AI systems in clinical environments to guarantee their efficacy and safety. Furthermore, it explores the significance of taking into account genetic and ethnic variation in patients when using AI applications. The utilization of the MobileNetV2 network for melanoma classification has demonstrated encouraging outcomes. The primary objective of this study is to utilize transfer learning to accurately categorize melanoma photos as either benign or malignant. The study proposes that deep learning models can be efficiently employed in mobile applications to offer accessible diagnostic tools [14]. The findings suggest that Vision Transformers (ViTs) hold significant promise in the detection of skin cancer, particularly in improving the identification of melanoma. The report provides suggestions for future research, including investigating the potential of hybrid models that integrate CNN and ViT technologies, as well as applying ViTs to various medical image categorization tasks [15], [16].

The study [17] examines many publicly accessible skin imaging datasets and their corresponding algorithms for the diagnosis of skin cancer. Another study employs convolutional neural networks (CNNs) to predict skin cancer at an early stage, integrating approaches for data augmentation [18]. This article examines the most advanced deep-learning models used for detecting skin cancer, with a particular focus on the utilization of the ISIC dataset [19]. A new study has integrated many advanced deep-learning models to improve the accuracy of melanoma detection using ISIC datasets [20]. In the literature on ablation research, commonly employed models include GoogLeNet, Inception3, Densenet201, Inception-ResNetV2, and a deep convolutional neural network (CNN) model called Darknet19. The work utilizes fine-tuning techniques on the ISIC 2019 skin cancer dataset, which comprises eight distinct classifications. The study presents a comparison of the performance of different models on the dataset, with Darknet19 demonstrating competitive outcomes [21][22]. This study conducts a comparative analysis of DenseNet201, DarkNet-19, and other neural networks in the context of skin cancer detection and classification. The analysis is conducted on a sample of 4000 images from the ISIC archive collection. DenseNet201 exhibited robust performance, while DarkNet-19 and other models also displayed noteworthy outcomes [23]. This article examines the utilization of networks such as AlexNet, DarkNet19, GoogleNet, and DenseNet201 that have been trained on the ISIC 2017 and HAM1000 datasets to detect skin cancer. The DenseNet201 model achieved the highest accuracy rate of 82.9% and had a balanced precision and recall, as indicated by its F1 score [24]. The paper compares DenseNet201 and an enhanced version of DarkNet-19 for the classification of skin lesions using the ISIC 2019 and PH2 datasets. DenseNet201 had superior performance in terms of both accuracy and resilience compared to other models [25]. Different research examines different convolutional neural networks, such as DenseNet201 and Darknet-19, to diagnose melanoma using the ISIC 2017 dataset [26]. The paper provides precise

metrics that demonstrate the great performance of DenseNet201 and other deep-learning models. This article examines the current developments in melanoma detection by comparing the performance of DarkNet-19, EfficientNet, and other models using ISIC datasets. The utilization of EfficientNets and ensemble approaches resulted in significant enhancements in classification accuracy [27]. The importance of artificial intelligence (AI) in skin cancer diagnosis is becoming increasingly evident, particularly in addressing the limitations of traditional methods. AI offers significant advantages, including the ability to analyze large datasets quickly and efficiently, which accelerates the diagnostic process and increases the capacity to serve more patients. Deep learning models, trained on extensive and diverse datasets, can achieve high accuracy and precision, crucial for the early detection of conditions like melanoma. AI systems capture subtle and complex details within skin lesions that might be overlooked by the human eye, providing a more comprehensive diagnostic tool. Furthermore, AI can standardize the diagnostic process, reducing the likelihood of human error and ensuring a more consistent approach across various cases. In contrast, traditional diagnostic methods such as dermoscopy and biopsy, while effective, have several limitations. These methods can be time-consuming and require specialized expertise, leading to delays and potential accessibility issues, especially in areas with a shortage of dermatologists. Human error is another concern, as factors like fatigue and distraction can impact diagnostic accuracy. Traditional approaches also struggle with the analysis of large volumes of data, as each image must be evaluated manually, which can be inefficient and prone to oversight. Additionally, variability in imaging techniques and equipment can affect the consistency of results. Overall, while traditional methods have been foundational in skin cancer diagnosis, AI presents a promising advancement by addressing these limitations and offering enhanced accuracy, efficiency, and standardization in the diagnostic process. A review of the literature reveals that no studies have compared only these three models and additionally performed ablation analysis—where parameters are altered in various layers of the models to observe changes in results. This study’s originality lies in its unique approach of both comparing these specific models and conducting ablation experiments to gain deeper insights into their performance. There is no study in the literature examining the impact of filter size on skin cancer detection in the applied models.

2. Material and Method

2.1. Data

In this study, 3256 images were obtained from the ISIC archive [skin cancer detection using pytorch | Kaggle](#). The distribution of data from the training, validation, and test sets used to diagnose skin cancer is shown in this table. There are 924 malignant and 1144 benign samples in the training set. We analyze the model's performance during training using the validation set, which consists of 288 benign and 240 malignant samples. The test set evaluates the final performance of the model and consists of 360 benign and 300 malignant samples. Understanding and evaluating this distribution is critical to assess the model's performance across various data sets. The model can be thoroughly tested thanks to the total of 2068 samples in the training set, 528 samples in the validation set, and 660 samples in the test set.

TABLE 1 SAMPLE OF SKIN CANCER DATASET

	BENIGN	MALIGN
TRAIN	1144	924
VALIDATION	288	240
TEST	360	300
TOTAL	1792	1464

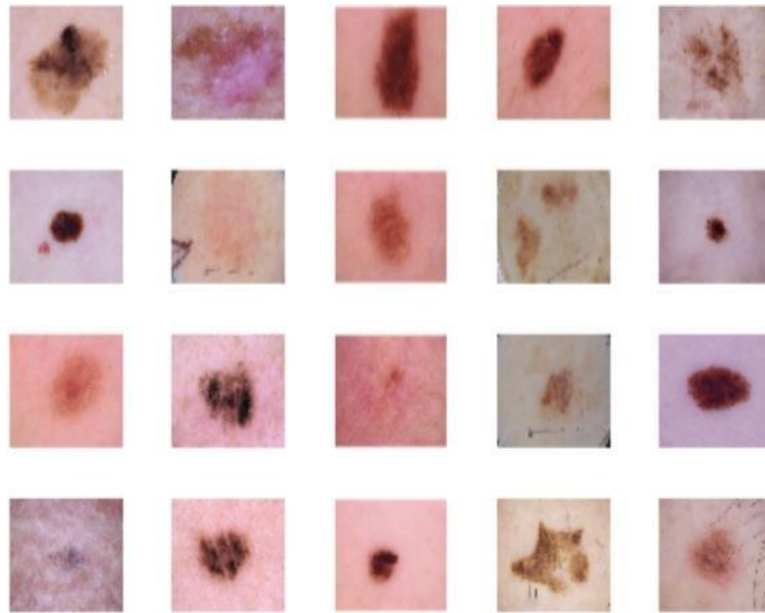


Figure 1. Examples from the dataset.

2.2. Model and Parameters

The categorization of diseases based on medical images was thoroughly examined by employing various recognized transfer learning architectures. The designs were pre-trained on the ImageNet dataset, and any modifications to the models and networks were made using the MATLAB environment [28]. Darknet19, EfficientNet, and DenseNet-201 are models used in the field of deep learning, each with different architectural designs. Each of these models has certain advantages and is optimized for various applications. Darknet19 was developed by Joseph Redmon and Ali Farhadi as part of the YOLO (You Only Look Once) object recognition system [29]. Darknet19 is a 19-layer convolutional neural network (CNN) and is optimized for fast and efficient object detection. Darknet19 has 19 convolutional layers followed by max pooling layers. Convolutional layers are used to extract features from the image while pooling layers provide more efficient computation by reducing the size of these features. The last layers contain fully connected layers and a softmax activation function for classification. This structure enables Darknet19 to perform fast and accurate object detection [29]. EfficientNet is an approach that optimizes model scaling and was developed by Google. This architecture aims to achieve high performance using combinations of width, depth and resolution. EfficientNet has a basic network architecture and this basic network is extended using systematic scaling methods to create larger and more complex models. EfficientNet-B0 is a small and efficient model as a starting point and the larger EfficientNet models (B1, B2, ... B7) are versions of this basic model at different scales. This systematic scaling method minimizes computational costs while improving performance [30]. DenseNet-201 is a densely connected convolutional neural network and was developed by Gao Huang et al. DenseNet-201 has 201 layers, and each layer receives information from all the previous layers. This densely connected structure prevents gradient loss and increases the information flow, allowing for more efficient learning. Another important feature of DenseNet-201 is that it reduces the number of parameters, making the model more compact and efficient. Each layer uses the output of the previous layers to create a stronger knowledge base, which increases the model's overall performance [31]. When these three methods were compared all of them had advantages and disadvantages.

TABLE 2 PARAMETERS OF MODELS

COMPONENT/HYPERPARAMETER	PARAMETERS
Test train split ratio	80-20
Input size (image)	227x227x3
'Initiallearnrate',	3e-4

Pooling layers	Max
Filter size	2x2 3x3 5x5
Epoch number	6
Activation function	ReLu
Batch size	10
Optimizer	SGDM

In the ablation study, we have tested several kernel sizes, including 2×2 , 3×3 , and 5×5 , to evaluate their impact on performance. The skin lesion classification task was performed using the models DarkNet19, EfficientNet, and DenseNet201. The following provides specifics on the hyperparameters that were used to train and assess the models: Test-Train Split Ratio: 20% was utilized for testing and 80% of the dataset was used for training. 3 channel (RGB) images with an input size of 227×227 pixels were utilized. Initial Learning Rate: $3e-4$ was the calculated value. This controls the speed at which the model updates its weights. As layers of pooling Max Pooling was applied. By doing this, significant features are preserved while the feature map size is decreased. For the filter size, three different filter sizes— 2×2 , 3×3 , and 5×5 —were used to compare the performances of the models. In the epoch number six epochs were used to train the model. This indicates the number of times the entire dataset was processed by the model. Rectified Linear Unit, or ReLU[32], activation function was applied. To improve the model's capacity for learning, this function zeroes out negative values and passes positive values through. For the batch size, ten was found to be the value. This is a reference to the quantity of data that is fed into the model at every training phase. Stochastic Gradient Descent with Momentum (SGDM) [33] was the optimization algorithm that was applied. To avoid local minima and accelerate learning, this method adds momentum. MATLAB software in version 2024 was utilized for this research. MATLAB [34] is an effective tool for processing data, building and evaluating models, and supporting a variety of deep-learning techniques. Carefully selected hyperparameters and training methods were employed to maximize model performance and achieve beneficial classification accuracy for skin lesions.

2.2. Performance Metrics

These metrics are used to evaluate the performance of the model in classifying skin cancer images. They help measure the correct diagnosis rates, false diagnosis rates, and the overall accuracy of the model.

TABLE 3 CONFUSION MATRIX REPRESENTATION

	Actual	
Predicted	TP	FP
	FN	TN

In machine learning and statistical models, it is a fundamental tool used to evaluate the performance of a classification algorithm. Confusion matrix is the most commonly used evaluation method for binary classification problems. It can also be used for multiple classification problems, but its interpretation is more complex. The table 3 explain TP: True positive (Refers to cases where a disease is present and accurately identified), TN: A true negative refers to a situation where a person is healthy and is appropriately diagnosed as such. FP: False positive (A situation when a person is healthy but is wrongly classified as having a medical condition), FN: False negative (Refers to cases where a person has a disease but is wrongly identified as not having it).

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

Accuracy indicates how accurately the model classified. It is the ratio of true positive (TP) and true negative (TN) results to the total number of tests.

$$\text{Sensitivity (Recall)} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

Sensitivity is a statistical measure that quantifies the proportion of genuine positive outcomes in relation to the combined number of true positives and false negatives. It provides insight into the accuracy of accurately identifying individuals with the condition.

$$\text{Specificity} = \frac{TN}{TN + FP} \quad (3)$$

Specificity is a statistical measure that quantifies the proportion of genuine negative findings in relation to the total of true negatives and false positives. It provides information on the accuracy of identifying healthy individuals.

$$\text{Positive Predictive Value} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (4)$$

The positive predictive value measures the proportion of those categorized as positive who are indeed affected by the disease. The term "precision" refers to the ratio of genuine positive findings to the combined number of true positives and false positives.

3. Results

The results obtained at the end of this study can be evaluated in two different steps. One step is to compare the classification success of three different types of transfer learning methods, and the second step is to apply ablation to these three different transfer learning methods. The results obtained by changing the filter size as the ablation application and the effect of the filter size are as follows. Accuracy performances of Darknet19, EfficientNet, and DenseNet models in classifying benign and malignant tumors for skin cancer using different filter sizes. The Darknet19 model generally has a lower accuracy rate compared to the other two models. Particularly, as the filter size increases, the performance of Darknet19 noticeably decreases; the accuracy rate, which is 71.97% with a 2x2 filter size, drops to 67.88% with a 3x3 filter size and to 61.82% with a 5x5 filter size. This shows that the model performs better with smaller filters but is overall less effective compared to other models. The EfficientNet model stands out with its consistent and high accuracy rates. The accuracy rate, which is 83.48% with a 2x2 filter size, slightly decreases to 83.03% with a 3x3 filter size, but exhibits its highest performance with 85.91% with a 5x5 filter size. These results demonstrate that EfficientNet performs better with larger filter sizes and has a significantly superior classification ability compared to Darknet19. The DenseNet model stands out as the model that achieves the highest accuracy rates. It starts with an accuracy rate of 84.39% at a filter size of 2x2 and achieves its highest performance with an accuracy rate of 87.73% at a filter size of 3x3. If the filter size is 5x5, it still provides a significantly high accuracy rate of 86.82%. It is often observed that when the filter size of DenseNet increases, its performance tends to improve, but it reaches its peak at a filter size of 3x3. B This study shows that DenseNet gives the most effective results with medium-sized filters and outperforms Darknet19 and EfficientNet in skin cancer classification.

Overall, this comparison demonstrates that the EfficientNet and DenseNet models are superior to Darknet19 in classifying skin cancer, particularly with DenseNet yielding the best results with a 3x3 filter size and EfficientNet achieving the highest accuracy rate with a 5x5 filter size. This also demonstrates that the filter size is a significant factor in model performance, and each model responds differently to different filter sizes. EfficientNet and DenseNet get higher accuracy with larger filter sizes, but Darknet19 has lower accuracy rates even when working with smaller filters and generally lags behind the other two models. The results of our analysis are summarized in the Table 4 and 5. We compared the performance of three different deep learning models (DarkNet19, EfficientNet and DenseNet201) using three different filter sizes (2x2, 3x3 and 5x5). The metrics used for evaluation are sensitivity, specificity, positive predictive value (PPV) and accuracy.

TABLE 4 PERFORMANCE METRICS RESULTS OF MODELS

Model	FilterSize	Sensitivity	Specificity	PPV	Accuracy
DarkNet19	2x2	0.67	0.92	0.97	0.72
	3x3	0.63	0.91	0.97	0.68
	5x5	0.56	0.63	0.96	0.56
EfficientNet	2x2	0.81	0.87	0.91	0.83
	3x3	0.81	0.87	0.91	0.83
	5x5	0.87	0.85	0.88	0.86
DenseNet201	2x2	0.82	0.89	0.92	0.84
	3x3	0.9	0.85	0.88	0.88
	5x5	0.89	0.84	0.87	0.87

TABLE 5 THE ACCURACY RESULTS FROM DIFFERENT FILTER SIZES OF MODELS

MODEL	2x2	3x3	5x5
Darknet19	0.7197	0.6788	0.6182
Efficient-Net	0.8348	0.8393	0.8591
Dense201	0.8439	0.8773	0.8682

TABLE 6 THE CONFUSION MATRIX RESULTS FROM DIFFERENT FILTER SIZES OF MODELS

	2x2		3x3		5x5	
DarkNet19	349	11	350	10	344	16
	174	126	202	98	273	27
EfficientNet	326	34	327	33	315	45
	75	225	79	221	48	252
DenseNet201	332	28	315	45	312	48
	75	225	36	264	39	261

TABLE 7 THE F-MEASURE RESULTS FROM DIFFERENT FILTER SIZES OF MODELS

	2x2	3x3	5x5
DarkNet19	0.79	0.76	0.70
EfficientNet	0.86	0.85	0.87
DenseNet201	0.72	0.67	0.66

The Table 5 compares the performance of DarkNet19, EfficientNet and DenseNet201 models on 2x2, 3x3 and 5x5 grid sizes using confusion matrixes. The correct and incorrect classification numbers of the models are used to evaluate their classification performance using confusion matrix. These results can be interpreted; while DarkNet19 has higher accuracy in small grid sizes such as 2x2 and 3x3, it also exhibits many incorrect classifications. The accuracy rate decreases in a 5x5 grid size as the number of misclassifications rises. These findings indicate that DarkNet19 has a decline in performance as the grid sizes increase. EfficientNet had a well-balanced performance across all grid sizes and achieved decreased misclassification rates compared to other models. This demonstrates that EfficientNet is a reliable model for classifying skin lesions. DenseNet201 achieved high performance when applied to grid sizes of 2x2 and 3x3. Nevertheless, while using a 5x5 grid size, the accuracy rate showed a modest reduction while the number of misclassifications increased. Table 6 shows the confusion metrics of the dataset and table 7 shows the F-measure (F1 score) performance of different convolutional neural network (CNN) architectures using various kernel sizes. DarkNet19 achieves its highest F1 score with a 2x2 kernel size (0.79), and performance decreases as the kernel size increases, with scores of 0.76 and 0.70 for 3x3 and 5x5 kernels, respectively. This suggests that DarkNet19 performs better with smaller kernels, which might capture local features more effectively. EfficientNet, on the other hand, consistently shows high F1 scores across all kernel sizes, peaking at 0.87 with a 5x5 kernel. This indicates that EfficientNet is more robust to changes in kernel size and benefits from larger kernels, potentially due to its efficient feature extraction capabilities. DenseNet201 exhibits the lowest F1 scores among the architectures, with a decreasing trend as the kernel size increases, scoring 0.72, 0.67, and 0.66 for 2x2, 3x3, and 5x5 kernels, respectively. This suggests that DenseNet201 might struggle with larger kernels and does not perform as well as the other models. Overall, EfficientNet demonstrates superior performance and adaptability across different kernel sizes, while DarkNet19 is effective with smaller kernels and DenseNet201 shows limited performance improvements with increasing kernel size. The results indicate that the EfficientNet model outperforms other models in the task of classifying skin lesions. The EfficientNet model stands out in its high sensitivity, specificity, positive predictive value, and accuracy across all filter sizes. This demonstrates the capability of EfficientNet in accurately classifying skin lesions. The DenseNet201 model likewise achieved excellent performance. The sensitivity and positive predictive value of the system are strong for both 2x2 and 3x3 filter sizes. Furthermore, the system maintains its high performance even with a 5x5 filter size. Nevertheless, the level of specificity is relatively low for certain filter sizes. The DarkNet19 model yielded inconclusive outcomes. Although the 2x2 filter size yields excellent specificity and positive predictive value, the sensitivity and accuracy scores are only average. Although the sensitivity and accuracy numbers are relatively low with a 3x3 filter size, they are significantly lower with a 5x5 filter size.

4. Discussion and Conclusion

This study aimed to answer these 2 questions:

- 1) Firstly, the objective is to compare the outcomes of transfer learning techniques that have not been employed for the simultaneous classification of skin cancer.
- 2) Secondly, the objective is to conduct ablation experiments in transfer learning approaches by modifying the filter size, and to analyze the impact of the filter size on the classification performance.

This study investigated the classification abilities of DarkNet19, EfficientNet, and DenseNet201 models in the classification of skin lesions. The models were tested using three different filter sizes: 2x2, 3x3, and 5x5. The EfficientNet model demonstrated better results compared across all filter sizes, exhibiting both balance and high efficiency. EfficientNet attracted attention, especially with its low misclassification rates and high sensitivity, PPV, and accuracy values. The DarkNet19 model demonstrated outperformed specifically with a 3x3 filter size but gave inconsistent results with other filter sizes. The EfficientNet model is the preferred option for skin lesion classification investigations. The study demonstrates the impact of various deep-learning models and filter sizes on the effectiveness of skin lesion categorization. It offers significant insights that can inform future research. In general, EfficientNet performs appropriately, although it does not achieve the same level of accuracy in classifying data as DenseNet201. According to these findings, we can conclude that the DenseNet201 model is the most efficient model for classifying skin lesions, as it exhibits low rates of misclassification and a well-balanced

performance. DenseNet201 provided accurate and reliable results on different filter sizes, without regard for their size. Thus, it is recommended to use DenseNet201 for studies including the classification of skin lesions.

Future research on data augmentation and diversity should prioritize these recommendations. Techniques for augmenting data are essential to improving the model's capacity for generalization on small data sets. Generative adversarial networks (GANs) [35], [36] can be used to generate synthetic data, which can be assessed in addition to data augmentation techniques like color substitution, random cropping, and vertical and horizontal flipping. Furthermore, a variety of ablation study designs can be used to investigate how particular model elements affect output. The accuracy of the model on a variety of skin types and lesions can be improved by supplementing the data set with information from other sources. The creation of more thorough and broadly applicable models will be aided by such methods.

References

- [1] R. L. Siegel, A. N. Giaquinto, and A. Jemal, 'Cancer statistics, 2024', *CA Cancer J Clin*, vol. 74, no. 1, pp. 12–49, Jan. 2024, doi: 10.3322/CAAC.21820.
- [2] M. P. Purdue et al., 'Etiologic and other factors predicting nevus-associated cutaneous malignant melanoma', *Cancer Epidemiology Biomarkers and Prevention*, vol. 14, no. 8, pp. 2015–2022, Aug. 2005, doi: 10.1158/1055-9965.EPI-05-0097.
- [3] N. J. Petrelli et al., 'Clinical cancer advances 2009: Major research advances in cancer treatment, prevention, and screening -A report from the American Society of Clinical Oncology', *Journal of Clinical Oncology*, vol. 27, no. 35, pp. 6052–6069, Dec. 2009, doi: 10.1200/JCO.2009.26.6171.
- [4] R. L. Siegel Mph, A. N. Giaquinto, | Ahmedin, J. Dvm, and R. L. Siegel, 'Cancer statistics, 2024', *CA Cancer J Clin*, vol. 74, no. 1, pp. 12–49, Jan. 2024, doi: 10.3322/CAAC.21820.
- [5] F. Morgese et al., 'Gender Differences and Outcomes in Melanoma Patients', *Oncol Ther*, vol. 8, no. 1, p. 103, Jun. 2020, doi: 10.1007/S40487-020-00109-1.
- [6] L. De Ann, R. I. Vogel, M. A. Weinstock, H. H. Nelson, R. L. Ahmed, and M. Berwick, 'Association between indoor tanning and melanoma in younger men and women', *JAMA Dermatol*, vol. 152, no. 3, p. 268, Mar. 2016, doi: 10.1001/JAMADERMATOL.2015.2938.
- [7] J. J. Nordlund and A. B. Lerner, 'On the causes of melanomas.', *Am J Pathol*, vol. 89, no. 2, p. 443, 1977, Accessed: Jul. 29, 2024. [Online]. Available: /pmc/articles/PMC2032245/?report=abstract
- [8] G. P. Guy, Z. Berkowitz, D. M. Holman, and A. M. Hartman, 'Recent Changes in the Prevalence of and Factors Associated With Frequency of Indoor Tanning Among US Adults', *JAMA Dermatol*, vol. 151, no. 11, p. 1256, Nov. 2015, doi: 10.1001/JAMADERMATOL.2015.1568.
- [9] G. P. Guy, Y. Zhang, D. U. Ekwueme, S. H. Rim, and M. Watson, 'The potential impact of reducing indoor tanning on melanoma prevention and treatment costs in the United States: An economic analysis', *J Am Acad Dermatol*, vol. 76, no. 2, pp. 226–233, Feb. 2017, doi: 10.1016/J.JAAD.2016.09.029.
- [10] B. Ahmed, M. I. Qadir, and S. Ghafoor, 'Malignant melanoma: Skin cancer—diagnosis, prevention, and treatment', *Crit Rev Eukaryot Gene Expr*, vol. 30, no. 4, pp. 291–297, 2020, doi: 10.1615/CRITREVEUKARYOTGENEEXPR.2020028454.
- [11] PDQ Cancer Genetics Editorial Board, 'Genetics of Skin Cancer (PDQ®): Health Professional Version', PDQ Cancer Information Summaries, 2002, Accessed: Jul. 30, 2024. [Online]. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26389333>
- [12] S. R. Jartarkar et al., 'Artificial intelligence in Dermatopathology', *J Cosmet Dermatol*, vol. 22, no. 4, pp. 1163–1167, Apr. 2023, doi: 10.1111/JOCD.15565.
- [13] G. H. Dagnaw, M. El Mouhtadi, and M. Mustapha, 'Skin cancer classification using vision transformers and explainable artificial intelligence', *J Med Artif Intell*, vol. 7, no. 0, pp. 14–14, Jun. 2024, doi: 10.21037/JMAI-24-6.
- [14] B. C. R. S. Furriel et al., 'Artificial intelligence for skin cancer detection and classification for clinical environment: a systematic review', *Front Med (Lausanne)*, vol. 10, p. 1305954, Jan. 2023, doi: 10.3389/FMED.2023.1305954/BIBTEX.
- [15] C. Xin et al., 'An improved transformer network for skin cancer classification', *Comput Biol Med*, vol. 149, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.COMPBIOMED.2022.105939.
- [16] C. Flosdorf, J. Engelker, I. Keller, and N. Mohr, 'Skin Cancer Detection utilizing Deep Learning: Classification of Skin Lesion Images using a Vision Transformer', Jul. 2024, Accessed: Jul. 30, 2024. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2407.18554v1>

- [17] D. Wen et al., 'Characteristics of publicly available skin cancer image datasets: a systematic review', [18] *Lancet Digit Health*, vol. 4, no. 1, pp. e64–e74, Jan. 2022, doi: 10.1016/S2589-7500(21)00252-1.
- [19] R. A. Mehr and A. Ameri, 'Skin Cancer Detection Based on Deep Learning', *J Biomed Phys Eng*, vol. 12, no. 6, p. 559, Dec. 2022, doi: 10.31661/JBPE.V010.2207-1517.
- [20] A. G. C. Pacheco and R. A. Krohling, 'Recent advances in deep learning applied to skin cancer detection', Dec. 2019, Accessed: Jul. 30, 2024. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1912.03280v1>
- [21] R. Ali, R. C. Hardie, B. N. Narayanan, and S. De Silva, 'Deep Learning Ensemble Methods for Skin Lesion Analysis towards Melanoma Detection', *Proceedings of the IEEE National Aerospace Electronics Conference, NAECON*, vol. 2019-July, pp. 311–316, Jul. 2019, doi: 10.1109/NAECON46414.2019.9058245.
- [22] M. A. Khan, T. Akram, M. Sharif, S. Kadry, and Y. Nam, 'Computer Decision Support System for Skin Cancer Localization and Classification', *Computers, Materials & Continua*, vol. 68, no. 1, pp. 1041– 1064, Mar. 2021, doi: 10.32604/CMC.2021.016307.
- [23] K. Thurnhofer-Hemsi and E. Domínguez, 'A Convolutional Neural Network Framework for Accurate Skin Cancer Detection', *Neural Process Lett*, vol. 53, no. 5, pp. 3073–3093, Oct. 2021, doi: 10.1007/S11063-020-10364-Y/TABLES/9.
- [24] H. Hussein, A. Magdy, R. F. Abdel-Kader, and K. A. El Salam, 'Binary Classification of Skin Cancer Images Using Pre-trained Networks with I-GWO', *Inteligencia Artificial*, vol. 27, no. 74, pp. 102–116, Dec. 2024, doi: 10.4114/INTARTIF.VOL27ISS74PP102-116.
- [25] M. Naqvi, S. Q. Gilani, T. Syed, O. Marques, and H. C. Kim, 'Skin Cancer Detection Using Deep Learning —A Review', *Diagnostics 2023*, Vol. 13, Page 1911, vol. 13, no. 11, p. 1911, May 2023, doi: 10.3390/DIAGNOSTICS13111911.
- [26] S. Benyahia, B. Meftah, and O. Lézoray, 'Multi-features extraction based on deep learning for skin lesion classification', *Tissue Cell*, vol. 74, p. 101701, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.TICE.2021.101701.
- [27] S. Alzahrani, B. Al-Bander, and W. Al-Nuaimy, 'A Comprehensive Evaluation and Benchmarking of Convolutional Neural Networks for Melanoma Diagnosis', *Cancers 2021*, Vol. 13, Page 4494, vol. 13, no. 17, p. 4494, Sep. 2021, doi: 10.3390/CANCERS13174494.
- [28] D. ; Popescu et al., 'New Trends in Melanoma Detection Using Neural Networks: A Systematic Review', [29] *Sensors 2022*, Vol. 22, Page 496, vol. 22, no. 2, p. 496, Jan. 2022, doi: 10.3390/S22020496.
- [30] 'Transfer Learning - MATLAB & Simulink'. Accessed: Jul. 31, 2024. [Online]. Available: [31] <https://www.mathworks.com/discovery/transfer-learning.html>
- [32] J. Redmon and A. Farhadi, 'YOLO9000: Better, faster, stronger', *Proceedings - 30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2017*, vol. 2017-January, pp. 6517–6525, Nov. 2017, doi: 10.1109/CVPR.2017.690.
- [33] M. Tan and Q. V Le, 'EfficientNet: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks', May 24, 2019, PMLR. Accessed: Jul. 30, 2024. [Online]. Available: <https://proceedings.mlr.press/v97/tan19a.html>
- [34] G. Huang, Z. Liu, L. Van Der Maaten, and K. Q. Weinberger, 'Densely Connected Convolutional Networks', *Proceedings - 30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2017*, vol. 2017-January, pp. 2261–2269, Aug. 2016, doi: 10.1109/CVPR.2017.243.
- [35] A. F. Agarap, 'Deep Learning using Rectified Linear Units (ReLU)', Mar. 2018, Accessed: Jul. 31, 2024. [36] [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1803.08375>
- [37] K. Tang, W. Liu, Y. Zhang, and X. Chen, 'Acceleration of stochastic gradient descent with momentum by averaging: finite-sample rates and asymptotic normality', May 2023, Accessed: Jul. 31, 2024. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2305.17665v2>
- [38] A. Biswas et al., 'Generative Adversarial Networks for Data Augmentation', *Data Driven Approaches on Medical Imaging*, pp. 159–177, Jun. 2023, doi: 10.1007/978-3-031-47772-0_8.
- [39] A. Antoniou, A. Storkey, and H. Edwards, 'Data Augmentation Generative Adversarial Networks', *J Phys A Math Theor*, vol. 44, no. 44, pp. 1–13, Nov. 2017, Accessed: Jul. 31, 2024. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1711.04340v3>

MIMO-FBMC/OQAM İletim Teknolojisi İçin Ayrık Karga Arama Algoritması Tabanlı Gelişmiş Bir Sembol Algılama Yöntemi

Şakir Şimşir*¹ 

*¹ Nevşehir Hacı Bektaş Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği, NEVŞEHİR

(Alınış / Received: 11.06.2024, Kabul / Accepted: 01.08.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.08.2024)

Anahtar Kelimeler

Karga Arama Algoritması,
FBMC/OQAM,
Sembol Algılama,
MIMO,
Maksimum Olasılık

Öz: Son yıllarda geliştirilmiş önde gelen iletim teknolojileri arasında yer alan çoklu-giriş çoklu-çıkış - filtre bankası çoklu taşıyıcı/ofset dördün genlik modülasyonu (MIMO-FBMC/OQAM), kablosuz iletişime has birçok problemi çözme yetisine sahip olmakla birlikte, alıcısında etkili bir sembol dedektörüne gereksinim duymaktadır. Bu çalışmada, MIMO-FBMC/OQAM sistemi için hem düşük karmaşık hem de yüksek sembol algılama performansına sahip yeni bir sembol dedektörü geliştirilmiştir. Bunun için, sembol vektörlerini kusursuz bir şekilde algılayabilen ancak bu işlemi oldukça yüksek bir araştırma maliyetine sebep olan kapsamlı arama prosedürü kullanarak gerçekleştiren klasik maksimum olasılık (ML) dedektörü modifiye edilmiştir. Söz konusu modifikasyonda, yüksek maliyetli kapsamlı arama prosedürü devre dışı bırakılarak, yerine sembol vektörlerinin optimizasyon işlemi gerçekleştirmek üzere ayrık karga arama algoritması (DCSA) entegre edilmiştir. Böylelikle, geleneksel ML yönteminin oldukça yüksek olan araştırma maliyeti düşürülmekle kalmayıp, optimuma yakın bir sembol algılama performansı elde edilmiştir.

An Advanced Symbol Detection Method Based on Discrete Crow Search Algorithm for MIMO-FBMC/OQAM Transmission Technology

Keywords

Crow Search Algorithm,
FBMC/OQAM,
Symbol Detection,
MIMO,
Maximum Likelihood

Abstract: Although multiple-input multiple-output – filter bank multicarrier/offset quadrature amplitude modulation (MIMO-FBMC/OQAM), which is among the prominent transmission technologies developed in recent years, has the capability of solving various problems peculiar to wireless communication, it requires an efficient symbol detector at its receiver. In this study, a new symbol detector with both low complexity and high symbol detection performance has been developed for MIMO-FBMC/OQAM system. For this, the classical maximum likelihood (ML) detector, which can detect the symbol vectors perfectly but performs this process by using an exhaustive search procedure that causes a quite high searching cost, was modified. In this modification, the high-cost exhaustive search procedure was disabled and instead, discrete crow search algorithm (DCSA) was integrated to carry out the optimization process of the symbol vectors. Thus, not only the pretty high search cost of the traditional ML method was reduced, but also a near-optimum symbol detection performance was achieved.

*İlgili Yazar, email: sakirsimsir@nevsehir.edu.tr

1. Giriş

Filtre bankası çoklu taşıyıcı/ofset dördün genlik modülasyonu (FBMC/OQAM: Filter bank multicarrier/offset quadrature amplitude modulation) [1, 2], gelecek nesil kablosuz sistemlerde geleneksel dikgen frekans bölme çözümlerinin (OFDM: Orthogonal frequency division multiplexing) [3, 4] yerini alma potansiyeline sahip önemli dalga formlarından bir tanesidir. FBMC/OQAM dalga formu, OFDM sistemine ait eksiklikleri ortadan kaldıracak benzersiz özellikleri ile öne çıkmaktadır. Örneğin; önemli oranda semboller arası girişime neden olan yüksek seviyeli yan loblara sahip olmak, OFDM sisteminin en önemli dezavantajları arasında yer alırken, filtre bankalarının kullanımı sayesinde elde edilen düşük yan loblar, FBMC/OQAM sisteminde neredeyse ihmal edilebilir düzeyde semboller arası girişime yol açmaktadır. Bunun yanı sıra, FBMC/OQAM sisteminde döngüsel önek kullanımına ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu nedenle, OFDM sistemine göre daha yüksek veri oranlarına ulaşmak mümkün hale gelmektedir. Ayrıca FBMC/OQAM sistemi, iletim sinyalinin çok düşük bitişik kanal sızıntı oranına sahip olması sayesinde bilişsel radyo uygulamalarıyla tam olarak uyumludur. Öte yandan hem frekans hem de zamanda iyi lokalize edilmiş darbe şekli kullanımı, FBMC/OQAM'yi mobil ortam için daha uygun bir iletişim sistemi haline getirmektedir [1, 2]. Yukarıda bahsedilen tüm bu üstün özelliklerin, çoklu antenler üzerinden veri iletimi gerçekleştirilerek çoklu-giriş çoklu-çıkış (MIMO: Multiple-input multiple output) teknolojisinin avantajlarıyla birleştirilmesi durumunda, FBMC/OQAM sisteminin kapasitesi çok daha yüksek bir seviyeye ulaşmaktadır [5, 6]. Sinyallerin çoklu anten yapısı üzerinden iletilmesi, sistem performansına önemli faydalar sağlamaktadır. Çoklu anten kullanımının sağladığı en önemli faydalardan birisi, çok yönlü kanalların sönmüleme etkilerinin ciddi oranda azaltılmasıdır. Böylelikle, daha düşük bit hata oranı (BER: Bit error rate) ile veri iletimi gerçekleştirmek mümkün hale gelmektedir. MIMO teknolojisinin bir diğer önemli avantajı ise kapasite artışıdır. Anten sayısındaki artış, sistem kapasitesinin yükselmesine yol açmaktadır. Bunun sonucunda, daha yüksek veri oranlarında iletişim sağlanabilmektedir [5, 6].

Diğer taraftan, MIMO-FBMC/OQAM alıcısında sembol vektörlerini en az hata ile algılayan ve bunu çok fazla işlem yüküne neden olmadan gerçekleştirebilen verimli bir sembol dedektörüne gereksinim duyulmaktadır. Sıfır zorlama (ZF: Zero forcing) dedektörü [7], kolay uygulanabilir yapısı nedeniyle sembol algılama problemini çözmek için ilk akla gelen yöntemlerden birisidir. Ancak söz konusu dedektör, çok basit yapısı sayesinde düşük bir karmaşıklığa sahip olsa da hiçbir sistemde tolere edilemeyecek bazı kritik zayıflıklara sahiptir. Zorlu kanal koşullarına olan hassasiyet, ZF yönteminin öne çıkan zayıflıklarından bir tanesidir. Bu zayıflık, ilgili yöntemin sembol algılama performansını önemli ölçüde düşürmektedir. Bunun yanı sıra, anten sayısı arttıkça ZF dedektörünün sembol algılama performansı daha da kötüye gitmektedir [7]. Maksimum olasılık (ML: Maximum likelihood) stratejisi [8], ZF ile birlikte farklı iletim teknolojilerinde en çok kullanılan yöntemlerden birisi olması sebebiyle, MIMO-FBMC/OQAM sisteminde sembol dedektörü olarak faydalanmak için ciddi bir seçenek olarak değerlendirilebilir. ZF dedektörünün aksine, sembol algılama performansı ML yönteminin en güçlü noktasıdır. En zayıf yanı ise sahip olduğu yüksek araştırma karmaşıklığıdır. Kullanmış olduğu kapsamlı arama prosedürü, ML stratejisinin optimum çözüme ulaşmasını garanti ederek kusursuz bir sembol algılama performansı sergilemesini sağlarken, ilgili arama prosedürü aynı zamanda araştırma karmaşıklığında aşırı bir artışa neden olmaktadır [8]. Sistem karmaşıklığında minimum artışa neden olarak sembol vektörlerini en yüksek doğrulukta algılama kapasitesine sahip verimli bir sembol dedektörü ihtiyacı göz önünde bulundurulduğunda ne ZF ne de ML dedektörü MIMO-FBMC/OQAM sistemindeki sembol algılama problemi için ideal bir çözüm olamaz.

Geleneksel ML yönteminde kapsamlı arama prosedürü kullanılarak sembol algılama işlemi gerçekleştirilirken, iletilme olasılığı en yüksek olan optimum sembol vektörü bulunmaya çalışılır. Bunun için iletilme olasılığı bulunan her bir sembol kombinasyonu, kanalın bozucu etkisine maruz kalarak alıcıya ulaşan sembol vektörü ile arasındaki Öklid mesafesi bakımından test edilir. En düşük Öklid mesafesine sahip olan sembol kombinasyonu, en yüksek iletilme olasılığına sahip sembol vektörü olarak ML dedektörü çıkışından elde edilir [8]. Diğer taraftan, ayrık araştırma uzayında yer alan her bir sembol kombinasyonu için Öklid hesabı gerçekleştirilerek optimum sembol vektörünü elde etmeye çalışmak yerine, sembol vektörlerini optimize ederek çok daha düşük bir araştırma maliyeti ile optimuma yakın bir çözüme ulaşmak mümkündür. ML dedektöründeki söz konusu optimizasyon işlemi yerine getirmek için, düşük araştırma maliyetleriyle tatmin edici sonuçlara ulaşabilme yeteneklerinden dolayı metasezgisel algoritmalar en doğru seçim olacaktır. Makalede ele alınan sembol algılama probleminde, her biri farklı bir karmaşık dördün genlik modülasyonu (QAM: Quadrature amplitude modulation) sembol kombinasyonundan oluşan sembol vektörleri direkt olarak ayrık uzayda optimize edilmektedir. Bu amaçla, sembol vektöründe yer alan her bir QAM sembolü, eşdeğeri olan ikili sayıya dönüştürülür. Böylelikle, her bir sembol vektörü ayrık uzayda optimize edilmek üzere ikili bit dizisi haline getirilmiş olur. Elde edilen ikili bit dizilerini optimize edebilmek için metasezgisel algoritmaların etkili ayrık versiyonlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaç göz önünde bulundurularak, ikili uzayda etkili bir araştırma yeteneğine sahip olan ayrık karga arama algoritması (DCSA: Discrete crow search algorithm) [9] önerilmiştir. Bu çalışmada, klasik CSA algoritmasının [10] söz konusu ayrık varyantı ML dedektörüne sembol optimizatörü olarak entegre edildikten sonra, DCSA-ML olarak adlandırılan

yeni bir sembol algılama stratejisi geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yeni strateji, ML ve ZF gibi geleneksel sembol dedektörlerinin yanı sıra ayırık ikili harmoni arama [11] tabanlı ML (DBHS-ML: Discrete binary harmony search-ML) ve ayırık yapay arı kolonisi [12] tabanlı ML (disABC-ML: Discrete artificial bee colony-ML) gibi gelişmiş ML stratejileri ile sembol algılama performansı bakımından karşılaştırılmıştır.

Literatürde farklı metasezgisel yaklaşımlar kullanılarak çeşitli iletişim sistemlerinde sembol vektörlerini algılamaya yönelik bazı çalışmalar mevcuttur. [13]'de, MIMO iletişim sistemlerinde sembol vektörlerinin algılanması için parçacık sürü optimizasyonu (PSO: Particle swarm optimization) algoritmasının standart ve ikili versiyonlarının kullanıldığı birkaç adet düşük karmaşıklık ML stratejisi geliştirilmiştir. [14]'te yazar, klasik ML yönteminin sahip olduğu aşırı karmaşıklığı azaltıp MIMO-dikgen olmayan çoklu erişim (MIMO-NOMA: MIMO-Non orthogonal multiple access) sisteminde potansiyel olarak kullanılabilir hale getirmek için geri izleme arama algoritmasından (BSA: Back-tracking search algorithm) yararlanmışır. [15]'te yazarlar, masif MIMO sistemindeki sembol algılama problemini çözmek için ABC algoritmasının doğrusal sembol dedektörü ile birlikte kullanıldığı bir sembol algılama stratejisi önermişlerdir. [16]'te, geniş-MIMO sistemlerde sembol dedektörü olarak kullanabilmek için PSO ve karınca koloni optimizasyon (ACO: Ant colony optimization) algoritmaları birleştirilerek hibrit bir optimizasyon algoritması geliştirilmiştir. [17]'da yazarlar, MIMO-OFDM alıcısında sembol vektörlerini düşük bir hesaplama yükü ile elde edebilmek için farksal gelişim (DE: Differential evolution) algoritması tabanlı ML stratejisi geliştirmişlerdir.

Bu çalışmanın literatüre olan temel katkıları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. Ayırık karga arama algoritması, haberleşme alanında karşılaşılan sembol algılama problemine literatürde ilk defa uygulanmıştır.
2. MIMO-FBMC/OQAM sisteminde sembol algılama probleminin çözümü için DCSA-ML olarak isimlendirilen geleneksel ML yönteminin modern bir versiyonu geliştirilerek yeni bir yaklaşım sunulmuştur. Bu yaklaşımda, DCSA isimli etkili bir ayırık CSA varyantı sembol optimizatörü olarak kullanılmakta olup, optimum sembol vektörüne ulaşmak için sistematik bir arama işlemi gerçekleştirilmektedir.
3. Önerilen DCSA algoritmasının ML dedektörüne entegre edilmesiyle birlikte, büyük miktarda karmaşıklık kazancı elde edilmiştir.
4. DCSA-ML yöntemi, üstün yakınsama yeteneği sayesinde DBHS-ML, disABC-ML ve geleneksel ZF dedektörlerinden daha iyi bir bit hata oranı performansı sergilemiştir.

Makalenin bundan sonraki kısmı şu şekilde düzenlenmiştir: 2. Bölümde, MIMO-FBMC/OQAM sistemi açıklanmıştır. 3. Bölümde, MIMO-FBMC/OQAM sistemindeki sembol algılama problemi matematiksel olarak tanımlanmıştır. 4. Bölümde, DCSA algoritması sunulmuştur. 5. Bölümde, geliştirilmiş olan DCSA-ML stratejisi anlatılmıştır. 6. Bölümde simülasyon sonuçları verilmiş olup, 7. Bölümde makale sonlandırılmıştır.

2. MIMO-FBMC/OQAM İletim Sisteminin Çalışma Prensipleri

Bu bölümde, MIMO-FBMC/OQAM iletim teknolojisi kullanılarak sinyallerin nasıl iletildiği ve iletilen sinyallerin alıcıda tekrardan nasıl elde edildiği en sade haliyle anlatılmıştır [5]. FBMC/OQAM sisteminde $\alpha_{n,t}$ şeklinde ifade edilen gerçek değerli sembollerin çoklu anten yerine tek bir anten kullanılarak iletilmesi durumunda, alıcıya ulaşan $y_{n,t}$ sinyalinin matematiksel ifadesi aşağıdaki gibi olmaktadır:

$$y_{n,t} \approx h_{n,t} \cdot (\alpha_{n,t} + j \cdot \beta_{n,t}) + \theta_{n,t} \quad (1)$$

Burada parantez içerisindeki ifadenin imajiner kısmını oluşturan $\beta_{n,t}$ içsel girişimi temsil ederken, $\theta_{n,t}$ alınan sinyale eklenmiş olan gürültü bileşenine karşılık gelmektedir. $h_{n,t}$ ise kanal katsayılarını ifade etmektedir. Bunun yanında, yukarıdaki denklemde alt simge olarak kullanılan n ve t , sırasıyla alt taşıyıcı ve zaman indisleridir. Öte yandan, FBMC/OQAM sisteminde çoklu anten üzerinden iletim gerçekleştirmek üzere vericide A_T adet, alıcıda ise A_R adet anten kullanıldığı takdirde, alıcının j 'inci anteninde elde edilen sinyal aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$y_{n,t}^{(j)} = \sum_{i=1}^{A_T} h_{n,t}^{(ji)} \cdot (\alpha_{n,t}^{(i)} + j \cdot \beta_{n,t}^{(i)}) + \theta_{n,t}^{(j)} \quad (2)$$

Burada i verici anten indisi, j ise alıcı anten indisidir. Örneğin, alıcı tarafta j 'inci anten tarafından alınan sinyal $y_{n,t}^{(j)}$ şeklinde ifade edilirken, j 'inci alıcı anten ile i 'inci verici anten arasındaki kanal katsayısı $h_{n,t}^{(ji)}$ tarafından temsil edilmektedir. Denklem (2)'nin matris tabanlı gösterimi aşağıdaki gibidir:

$$\begin{bmatrix} y_{n,t}^{(1)} \\ \vdots \\ y_{n,t}^{(A_R)} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} h_{n,t}^{(11)} & \cdots & h_{n,t}^{(1A_T)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n,t}^{(A_R 1)} & \cdots & h_{n,t}^{(A_R A_T)} \end{bmatrix}}_{\mathbf{H}_{n,t}} \underbrace{\begin{bmatrix} \alpha_{n,t}^{(1)} + j \cdot \beta_{n,t}^{(1)} \\ \vdots \\ \alpha_{n,t}^{(A_T)} + j \cdot \beta_{n,t}^{(A_T)} \end{bmatrix}}_{\boldsymbol{\alpha}_{n,t} + j \cdot \boldsymbol{\beta}_{n,t}} + \underbrace{\begin{bmatrix} \theta_{n,t}^{(1)} \\ \vdots \\ \theta_{n,t}^{(A_R)} \end{bmatrix}}_{\boldsymbol{\theta}_{n,t}} \quad (3)$$

$$\mathbf{Y}_{n,t} = \mathbf{H}_{n,t} \cdot (\boldsymbol{\alpha}_{n,t} + j \cdot \boldsymbol{\beta}_{n,t}) + \boldsymbol{\theta}_{n,t} \quad (4)$$

Burada alınan sinyaller, kanal katsayıları, içsel girişimli gerçek değerli semboller ve gürültü bileşenleri sırasıyla $A_R \times 1$, $A_R \times A_T$, $A_T \times 1$ ve $A_R \times 1$ boyutlu matrisler ile ifade edilmektedir.

3. Problemin Tanımlanması

3.1. FBMC/OQAM için matris tabanlı sistem açıklaması

FBMC/OQAM sistemini matris formunda ifade ederek sembol algılama problemini daha sade ve anlaşılır kılmak mümkündür [6]. FBMC/OQAM vericisinde kullanılan prototip filtre, her biri D sayıda zaman örneği $\mathbf{g}_{n,t} \in \mathbb{C}^{D \times 1}$ iletim vektörlerinin birleşiminden oluşan $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{D \times NT}$ iletim matrisi şeklinde aşağıdaki gibi tanımlanabilmektedir:

$$\mathbf{G} = [\mathbf{g}_{1,1} \ \mathbf{g}_{2,1} \ \cdots \ \mathbf{g}_{N,1} \ \mathbf{g}_{1,2} \ \mathbf{g}_{2,2} \ \cdots \ \mathbf{g}_{N,2} \ \cdots \ \mathbf{g}_{1,T} \ \mathbf{g}_{2,T} \ \cdots \ \mathbf{g}_{N,T}] \quad (5)$$

Yukarıdaki ifadeden de anlaşılacağı üzere, \mathbf{G} matrisinde yer alan $\mathbf{g}_{n,t}$ iletim vektörlerinin toplam sayısı $N \times T$ 'ye eşit olmaktadır. Burada N alt taşıyıcı sayısına karşılık gelirken, T sembol sayısını belirtmektedir. Matris tabanlı tanımlama, aşağıda gösterildiği gibi gerçek değerli semboller için de yapılabilir:

$$\boldsymbol{\alpha} = \text{vec} \left\{ \begin{bmatrix} \alpha_{1,1} & \cdots & \alpha_{1,T} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{N,1} & \cdots & \alpha_{N,T} \end{bmatrix} \right\} = [\alpha_{1,1} \ \alpha_{2,1} \ \cdots \ \alpha_{N,1} \ \alpha_{1,2} \ \alpha_{2,2} \ \cdots \ \alpha_{N,2} \ \cdots \ \alpha_{1,T} \ \alpha_{2,T} \ \cdots \ \alpha_{N,T}]^T \quad (6)$$

Burada $\boldsymbol{\alpha} \in \mathbb{C}^{NT \times 1}$ ile temsil edilen sembol vektörü, Denklem (5)'te tanımlanan iletim matrisi ile çarpılarak $\mathbf{s} \in \mathbb{C}^{D \times 1}$ şeklinde ifade edilen iletim sinyali üretilmektedir:

$$\mathbf{s} = \mathbf{G}\boldsymbol{\alpha} \quad (7)$$

İletim işleminden sonra alıcı girişine ulaşan sinyalin matematiksel ifadesi aşağıdaki gibi olacaktır:

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \boldsymbol{\theta} = \mathbf{H}\mathbf{G}\boldsymbol{\alpha} + \boldsymbol{\theta} \quad (8)$$

Burada $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{D \times D}$ konvolüsyon matrisi, çok yollu kanalı modellemektedir. $\mathbf{r} \in \mathbb{C}^{D \times 1}$ alıcıya gelen sinyale karşılık gelirken, $\boldsymbol{\theta}$ Gauss gürültüsünü sembolize etmektedir. Son olarak, aşağıdaki formülasyon kullanılarak alınan semboller elde edilmektedir:

$$\mathbf{y} = \mathbf{G}^H \mathbf{r} = \mathbf{G}^H \mathbf{H}\mathbf{G}\boldsymbol{\alpha} + \mathbf{G}^H \boldsymbol{\theta} \quad (9)$$

3.2. FBMC/OQAM sisteminde blok frekans yayılımı

FBMC/OQAM sistemindeki diklik kısıtlamasının neden olduğu içsel girişim, OFDM sistemine kolaylıkla uygulanabilen MIMO yöntemlerinin FBMC/OQAM sistemine direkt olarak uygulanmasını imkânsız hale getirmektedir. Diğer taraftan, [6]'da önerilen blok frekans yayılım stratejisi ile karmaşık diklik yeniden sağlanarak FBMC/OQAM sistemini OFDM sisteminde kullanılan MIMO metotlarının tamamı ile uyumlu hale getirmek mümkündür. Bu çalışmada, MIMO algılama metotlarının klasik MIMO-OFDM sistemine olduğu gibi direkt olarak MIMO-FBMC/OQAM sistemine de uygulanabilmesi için, FBMC/OQAM sisteminde blok frekans yayılım yaklaşımından faydalanılmıştır [6].

Blok frekans yayılım yaklaşımı kullanılan FBMC/OQAM vericisinde, yayma işlemi için $\mathbf{P} \in \mathbb{C}^{\frac{NT}{2} \times \frac{NT}{2}}$ ile ifade edilen bir ön kodlama matrisinden yararlanır. Söz konusu yayma işleminde, $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{\frac{NT}{2} \times 1}$ QAM sembol dizisi, ilgili ön kodlama matrisi ile aşağıdaki gibi çarpılarak $\mathbf{a} \in \mathbb{C}^{NT \times 1}$ gerçek değerli sembol dizisi elde edilir:

$$\mathbf{a} = \mathbf{P}\mathbf{x} \quad (10)$$

Alıcıda ise yayma işleminin tam tersi olan aşağıdaki işlem yerine getirilir:

$$\mathbf{y} = \mathbf{P}^H \mathbf{y} \quad (11)$$

Denklem (11)'i aşağıdaki gibi genişletilmiş formda da ifade etmek mümkündür:

$$\mathbf{y} = \mathbf{P}^H \mathbf{G}^H \mathbf{H} \mathbf{G} \mathbf{P} \mathbf{x} + \mathbf{P}^H \mathbf{G}^H \boldsymbol{\theta} \quad (12)$$

3.3. Sembol algılama probleminin formülasyonu

Blok frekans yayılım prosedürü uygulanmış tek antenli bir FBMC/OQAM sisteminde $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{\frac{NT}{2} \times 1}$ matrisi, $\frac{NT}{2}$ adet bileşene sahip QAM sembol dizisini temsil etmektedir. İlgili sistemde, QAM sembollerini A_T adet verici ve A_R adet alıcı anten üzerinden iletmek üzere MIMO anten konfigürasyonu kullanılması durumunda, $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{\frac{NT}{2} \times 1}$ sembol matrisi içerisindeki her bir element, $x_{n,t} = [x_{n,t}^{(1)}, x_{n,t}^{(2)}, \dots, x_{n,t}^{(A_T)}]^T$ şeklinde tanımlanan A_T uzunluklu sembol vektörü haline dönüşmektedir. Burada n ve t , sırasıyla alt taşıyıcı ve sembol indislerini belirtmektedir. Benzer şekilde, MIMO-FBMC/OQAM sisteminin A_R adet antene sahip alıcısında, $x_{n,t}$ sembol vektörünün alıcıya ulaşmış olan formu, $y_{n,t} = [y_{n,t}^{(1)}, y_{n,t}^{(2)}, \dots, y_{n,t}^{(A_R)}]^T$ şeklinde ifade edilmektedir. Buna göre, iletilen ve alınan sembol vektörlerinin içermiş oldukları sembol sayıları sırasıyla verici ve alıcı anten sayılarına eşit olacaktır. Bunun haricinde, $x_{n,t}$ vektöründe yer alan QAM sembollerinden herhangi birinin alabileceği karmaşık değer sayısı, QAM modülasyon seviyesi tarafından belirlenen yıldız kümesi noktalarının sayısına (yıldız kümesi boyutu) eşittir. MIMO-FBMC/OQAM sisteminde kullanılan QAM modülasyon tekniğinin yıldız kümesi boyutu Q değişkeni ile sembolize edilecek olursa, $x_{n,t}$ vektöründe yer alan her bir QAM sembolünün alabileceği değer sayısı Q' ya eşit olacaktır. A_T uzunluklu $x_{n,t}$ sembol vektörünün A_T adet QAM sembolü içerdiği göz önünde bulundurulduğunda, iletebilecek olası sembol dizilerinin sayısı Q^{A_T} olarak hesaplanacaktır. Geleneksel ML yönteminde, Q^{A_T} adet alternatif $x_{n,t}$ sembol dizisi arasından maksimum iletilme olasılığına sahip olanı bulmak amacıyla, söz konusu sembol dizilerinin her biri aşağıdaki eşitlik vasıtasıyla değerlendirilmektedir:

$$x_{n,t}^* = \arg \min_{x_{n,t}} \left\{ \left\| y_{n,t} - H_{n,t} \cdot x_{n,t} \right\|^2 \right\} \quad (13)$$

Yukarıdaki ifadede, olası $x_{n,t}$ sembol kombinasyonlarının her biri, ilgili $A_R \times A_T$ boyutlu $H_{n,t}$ kanal matrisi ile çarpılır. Bu çarpımlar sonucunda elde edilen vektörlerin her biri, alınan sinyale olan Öklid mesafesi bakımından test edilir. Son olarak, $H_{n,t}$ kanal matrisi ile çarpıldığında alınan sinyale minimum Öklid mesafesini veren $x_{n,t}$ vektörü, iletilme olasılığı en yüksek olan optimum sembol vektörü olarak belirlenir. Geleneksel ML dedektörü, $x_{n,t}^*$ ile sembolize edilen optimum sembol vektörünü bulabilmek için, olası her bir $x_{n,t}$ kombinasyonu başına bir Öklid hesabı gerçekleştirmek zorundadır. Buna göre, sembol algılama işlemi sonuçlanana kadar gerçekleştirilen toplam Öklid hesabı sayısı, olası sembol kombinasyonlarının toplam sayısına (Q^{A_T}) ulaşacaktır.

Denklem (13)'te yapılan varsayımın aksine, $H_{n,t}$ tarafından temsil edilen gerçek kanal katsayıları pratik uygulamalarda alıcı tarafından hatasız bir şekilde kestirilememektedir. Diğer bir ifade ile, gerçek uygulamalarda alıcı, Denklem (13)'teki gibi kusursuz bir kanal bilgisine sahip değildir. Bu nedenle bu çalışmada, kanal kestirim

hataları da göz önünde bulundurularak, ML tabanlı sembol algılama işlemi aşağıdaki gibi yeniden formüle edilmiştir:

$$x_{n,t}^* = \arg \min_{x_{n,t}} \left\{ \left\| y_{n,t} - \hat{H}_{n,t} \cdot x_{n,t} \right\|^2 \right\} \quad (14)$$

Burada $\hat{H}_{n,t}$, aşağıda tanımı verilen hatalı kanal katsayılarına karşılık gelmektedir [18].

$$\hat{H}_{n,t} = H_{n,t} + e \cdot \omega \quad (15)$$

Yukarıdaki eşitlikte, gerçek kanal katsayılarına eklenmiş olan $e \cdot \omega$ ifadesinde, e kestirim hatasını belirlerken, ω birim varyansa ve sıfır ortalamaya sahip karmaşık Gauss değişkene karşılık gelmektedir.

4. Ayrık Karga Arama Algoritması (DCSA)

Bilim dünyasına sunulmasının üzerinden henüz on yıl bile geçmemiş olmasına rağmen karga arama algoritması (CSA: Crow search algorithm) [10], çeşitli alanlardaki başarılı uygulamaları sayesinde popülaritesini önemli ölçüde artırmıştır. Ancak söz konusu algoritma başlangıçta sürekli optimizasyon problemleri için geliştirilmiş olup, ML dedektöründe QAM sembol vektörlerinin optimizasyonu gibi kombinatoriyal bir optimizasyon problemi doğrudan ayrık uzayda çözmeye uygun değildir. Bu nedenle bu çalışmada, orijinal CSA algoritmasının döngüsel bit çevirme tabanlı oldukça dinamik bir araştırma mekanizmasına sahip DCSA [9] isimli etkili bir ayrık versiyonundan faydalanılmıştır. DCSA algoritmasında, D -boyutlu ayrık çözüm uzayındaki karga pozisyonları aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$w_z^{(d)} = \left[w_z^{(1)}, w_z^{(2)}, \dots, w_z^{(D)} \right] \quad , \quad z = 1, 2, \dots, Z \quad (16)$$

Burada z karga indisini ifade ederken, Z sürüde yer alan toplam karga sayısını belirtmektedir. $w_z^{(d)} \in \{0, 1\}$ olup $w_z^{(d)}$ vektörünün her bir elemanı ya "0" ya da "1" değeri almaktadır. Her bir karganın güncel en iyi yiyecek pozisyonunu sakladığı hafıza vektörü ise aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$m_z^{(d)} = \left[m_z^{(1)}, m_z^{(2)}, \dots, m_z^{(D)} \right] \quad , \quad z = 1, 2, \dots, Z \quad (17)$$

Mevcut karga popülasyonunda pozisyon güncellemesi gerçekleştirilirken şu şekilde bir yol izlenmektedir: Öncelikle sürüde yer alan Z adet kargadan her biri için $r_z \in [0, 1]$ olacak şekilde rastgele bir sayı üretilir. Buradaki r_z değişkeni, z 'inci karga için üretilen rastsal sayıya karşılık gelmektedir. Ardından ilgili karga için üretilmiş olan r_z sayısı, AP şeklinde sembolize edilen farkındalık olasılığı parametresi ile karşılaştırılır. Optimizasyon işlemine başlamadan önce belirlenmesi gereken AP parametresinin değer aralığının $[0, 1]$ olduğu unutulmamalıdır. Bu noktadan itibaren ortaya çıkması muhtemel iki farklı durum mevcuttur:

Durum 1:

$r_z \geq AP$ olması durumunda, döngüsel bit çevirme mekanizması [19] kullanılarak z 'inci karganın ayrık uzaydaki pozisyonu güncellenir. Bunun için öncelikle ilgili karga pozisyonu aşağıdaki gibi bit çevirme işlemine tabi tutulur:

$$w_z^{(d), yeni} = flip(w_z^{(d)})_{c_z} \quad (18)$$

Burada $w_z^{(d)}$ vektörünün komşuluğunda yeni bir pozisyon üretmek için, ilgili vektörün c_z 'inci boyutunda yer alan elemana $flip(\cdot)_{c_z}$ operatörü kullanılarak bit çevirme işlemi uygulanmaktadır. Pozisyon vektörlerinin ikili bit dizilerinden oluşması sebebiyle, $w_z^{(d)}$ vektörünün c_z 'inci boyutunda yer alan elemanın bit çevirme işlemine tabi tutulması demek, ilgili elemanın 0'dan 1'e ya da 1'den 0'a dönüştürülmesi anlamına gelmektedir. Burada c_z , z 'inci karganın bit çevirme indisini belirtmektedir. Söz konusu indisin başlangıç değeri, her bir karga için $c_z = 1$ olacak şekilde ayarlanır. Bit çevirme işlemi gerçekleştirildikten sonra yeni çözüm için uygunluk hesabı yapılır. Eğer yeni üretilen $w_z^{(d), yeni}$ komşu çözüm, $w_z^{(d)}$ çözümüne göre daha iyi bir uygunluk değerine sahipse, $w_z^{(d)}$ çözümünün yerini alır. Ters durumda, $w_z^{(d)}$ çözümünde herhangi bir güncelleme yapılmaz. Bunun yanı sıra, söz konusu yeni

çözüm, z' inci karganın $m_z^{(d)}$ hafıza vektöründe saklanan güncel en iyi çözümü ile uygunluk değeri bakımından karşılaştırılır. $w_z^{(d),yeni}$ çözümünün uygunluk değeri, $m_z^{(d)}$ hafıza vektöründe kayıtlı olan çözümün uygunluk değerinden daha iyi ise, $w_z^{(d),yeni}$ çözümü güncel en iyi çözüm olarak $m_z^{(d)}$ vektörüne kaydedilip z' inci karga için hafıza güncellemesi gerçekleştirilir. Ters durumda ilgili karganın hafızasında herhangi bir değişiklik gerçekleştirilmez. Söz konusu hafıza ve pozisyon güncellemeleri tamamlandıktan sonra, z' inci kargaya ait bit çevirme indisinin değeri aşağıdaki gibi 1 artırılarak gelecek iterasyonlarda $r_z \geq AP$ koşulunun z' inci karga için yeniden sağlanması durumunda, bit çevirme işleminin aynı eleman üzerinde gerçekleştirilmeyip bir sonraki vektör elemanından devam etmesi garanti altına alınır:

$$c_z = c_z + 1 \quad (19)$$

Optimizasyon işlemi boyunca bit çevirme işleminin her bir karga için döngüsel bir şekilde sürmesini sağlamak amacıyla, Denklem (19)'da gerçekleştirilen güncellenmenin ardından c_z indisi, aşağıdaki kontrol mekanizmasından geçirilir:

$$c_z = \text{mod}(c_z - 1, D) + 1 \quad (20)$$

Burada $\text{mod}(c_z - 1, D)$ operatörü, $(c_z - 1)$ 'in D 'ye bölümünden kalanı vermektedir. Örneğin, z' inci karga için $r_z \geq AP$ şartının sağlandığı her iterasyonda, ilgili karganın bit çevirme indisi Denklem (19)'da gösterildiği gibi 1 artırılır. Bu nedenle, iterasyonlar ilerledikçe, c_z indisinin $D + 1$ değerine ulaşarak toplam vektör boyutu sayısını (vektör uzunluğunu) aşması kaçınılmaz hale gelecektir. Denklem (20)'de verilen kontrol mekanizması sayesinde, c_z indisinin D 'den daha büyük bir değer almasına izin verilmez. c_z indisi $D + 1$ değerine her ulaştığında, ilgili kontrol mekanizması ile hemen başlangıç noktasına yani 1 değerine döndürülür. DCSA algoritmasında komşu çözüm üretimi için döngüsel bit çevirme prosedürünün kullanılması, ayrık çözüm uzayının oldukça yoğun ve sistematik bir şekilde araştırılmasını mümkün kılmaktadır.

Durum 2:

$r_z < AP$ ise, z' inci karga ayrık uzayda rastgele bir pozisyona kaydırılır. Bunun için ilgili karganın pozisyon vektörü aşağıdaki gibi mutasyon işlemine tabi tutulur:

$$w_z^{(d),mutant} = \text{mut}_{1 \leq d \leq D} (w_z^{(d)}, NB) \quad (21)$$

Yukarıda verilen mutasyon operatörü vasıtasıyla, $w_z^{(d)}$ pozisyon vektörünün $1 \leq d \leq D$ aralığındaki boyutlarında yer alan elemanlarından rastgele seçilen NB sayıda bit mutasyona uğratılır ("0" ise "1", "1" ise "0" yapılır). Bu şekilde kontrollü olarak gerçekleştirilen mutasyon işlemi sayesinde, DCSA algoritmasının yerel minimumlara takılma olasılığı en aza indirilmektedir.

5. Ayrık Karga Arama Algoritması Tabanlı ML Yöntemi

Bir tür ikili optimizasyon algoritması olması sebebiyle, DCSA algoritmasının karmaşık QAM sembollerinin optimizasyonu için ML dedektörüne doğrudan entegrasyonu mümkün değildir. Diğer taraftan, bu gibi ayrık optimizasyon algoritmalarını sembol algılama probleminde etkili bir şekilde kullanmanın kolay bir yolu vardır. Optimize edilecek sembol vektörleri karmaşık değerli QAM sembollerinden oluşsa bile, $x_{n,t} = [x_{n,t}^{(1)}, x_{n,t}^{(2)}, \dots, x_{n,t}^{(A_T)}]^T$ şeklinde ifade edilen ilgili vektörleri direkt olarak ikili arama uzayında optimize etmek mümkündür. $x_{n,t}$ sembol vektörünü ikili optimizasyona uygun hale getirmek için yapılması gereken tek şey, optimizasyon işlemi boyunca söz konusu vektörün ikili eşdeğerini kullanmaktır. Diğer bir ifade ile, QAM sembol vektörlerini ikili arama uzayında DCSA algoritması tarafından optimize edilmeye uygun hale getirmek için ikili bit dizileri olarak temsil edebiliriz. $x_{n,t}$ vektöründeki her bir QAM sembolü tarafından taşınan bit sayısı $\log_2^Q = k$ olarak hesaplandığından dolayı, sembol vektörlerinin ikili eşdeğerleri $(k \cdot A_T)$ uzunluğunda olacaktır. Örneğin, modülasyon türü olarak 4-QAM kullanıldığı takdirde, her bir karmaşık değerli sembol $\log_2^4 = 2$ adet ikili bit taşıyacaktır. Bu durumda, her bir sembol vektöründeki toplam bit sayısı $(2 \cdot A_T)$ değerine eşit olacaktır. Bu çalışmada önerilen DCSA-ML isimli sembol algılama stratejisinde, karmaşık değerli QAM sembol dizileri ve bu dizilerin ikili bit dizisi versiyonları karga pozisyonları olarak aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$x_z^{(i)} = [x_z^{(1)}, x_z^{(2)}, \dots, x_z^{(A_T)}] \quad , \quad z = 1, 2, \dots, Z \quad (22)$$

$$b_z^{(j)} = [b_z^{(1)}, b_z^{(2)}, \dots, b_z^{(k \cdot A_T)}] \quad , \quad z = 1, 2, \dots, Z \quad (23)$$

Burada $b_z^{(j)} \in \{0,1\}$ 'dir. DCSA-ML stratejisi aşağıda adım adım anlatılmıştır:

Adım 1: İlk olarak, başlangıç karga popülasyonu oluşturulur. Bunun için Denklem (23)'te tanımlanan ikili bit dizisi formunda Z adet rastgele pozisyonlarda çözüm vektörleri üretilir. Rasgele bir şekilde üretilmiş olan söz konusu başlangıç pozisyonları, aynı zamanda hafıza vektörlerine de kaydedilir. Aşağıda z 'inci karganın hafıza vektörü tanımlanmıştır:

$$m_z^{(j)} = [m_z^{(1)}, m_z^{(2)}, \dots, m_z^{(k \cdot A_T)}] \quad , \quad z = 1, 2, \dots, Z \quad (24)$$

Adım 2: Başlangıç popülasyon üyelerinin rastgele üretilmesinin ardından, her birinin uygunluk değeri hesaplanır. $b_z^{(j)}$ şeklinde ikili QAM sembol vektörü olarak tanımlanan herhangi bir popülasyon üyesinin uygunluk değerini hesaplamadan önce, ilgili sembol vektörünün $x_z^{(i)}$ şeklinde tanımlanan karmaşık eşdeğerine dönüştürülmesi gerekmektedir. Söz konusu dönüşüm gerçekleştirildikten sonra, ilgili popülasyon üyesini aşağıda verilen uygunluk fonksiyonunda yerine yazıp uygunluk değerini hesaplayabiliriz:

$$f_z = \text{fit}(x_z^{(i)}) = \|y_{n,t} - \hat{H}_{n,t} \cdot x_z^{(i)}\|^2 \quad , \quad z = 1, 2, \dots, Z; \quad i = 1, 2, \dots, A_T \quad (25)$$

Burada f_z , karga sürüsündeki z 'inci popülasyon üyesinin uygunluk değerine karşılık gelmektedir.

Adım 3: Popülasyondaki her bir karga için $r_z \in [0,1]$ şeklinde tanımlanan rastgele bir sayı üretilir ve üretilen bu sayı daha sonra AP parametresi ile karşılaştırılır.

Adım 4: $r_z \geq AP$ olması halinde, z 'inci kargadan bir adet komşu çözüm üretmek için, ilgili kargaya ait pozisyon vektörüne aşağıdaki gibi bit çevirme işlemi uygulanır:

$$b_z^{(j),\text{yeni}} = \text{flip}(b_z^{(j)})_{c_z} \quad (26)$$

Üretilen $b_z^{(j),\text{yeni}}$ çözüm vektörü, ikili bit dizisi halinden karmaşık değerli formuna karşılık gelen $x_z^{(i),\text{yeni}}$ vektörüne dönüştürüldükten sonra, aşağıdaki fonksiyon vasıtasıyla uygunluk değeri hesaplanır:

$$f_z^{\text{yeni}} = \text{fit}(x_z^{(i),\text{yeni}}) = \|y_{n,t} - \hat{H}_{n,t} \cdot x_z^{(i),\text{yeni}}\|^2 \quad (27)$$

Burada f_z^{yeni} , z 'inci kargadan üretilmiş olan yeni çözümün uygunluk değerini ifade etmektedir. Uygunluk hesabının ardından, sırasıyla hem $b_z^{(j)}$ ve $b_z^{(j),\text{yeni}}$ arasında, hem de $m_z^{(j)}$ ve $b_z^{(j),\text{yeni}}$ arasında uygunluk kalitesi bakımından aç gözlü seçim işlemi gerçekleştirilir. Daha sonra, bit çevirme işleminin optimizasyon işlemi süresince her bir popülasyon üyesi için döngüsel bir şekilde ilerlemesini sağlamak amacıyla, bit çevirme indisi olarak bilinen c_z parametresi aşağıdaki işlemlerden geçirilir:

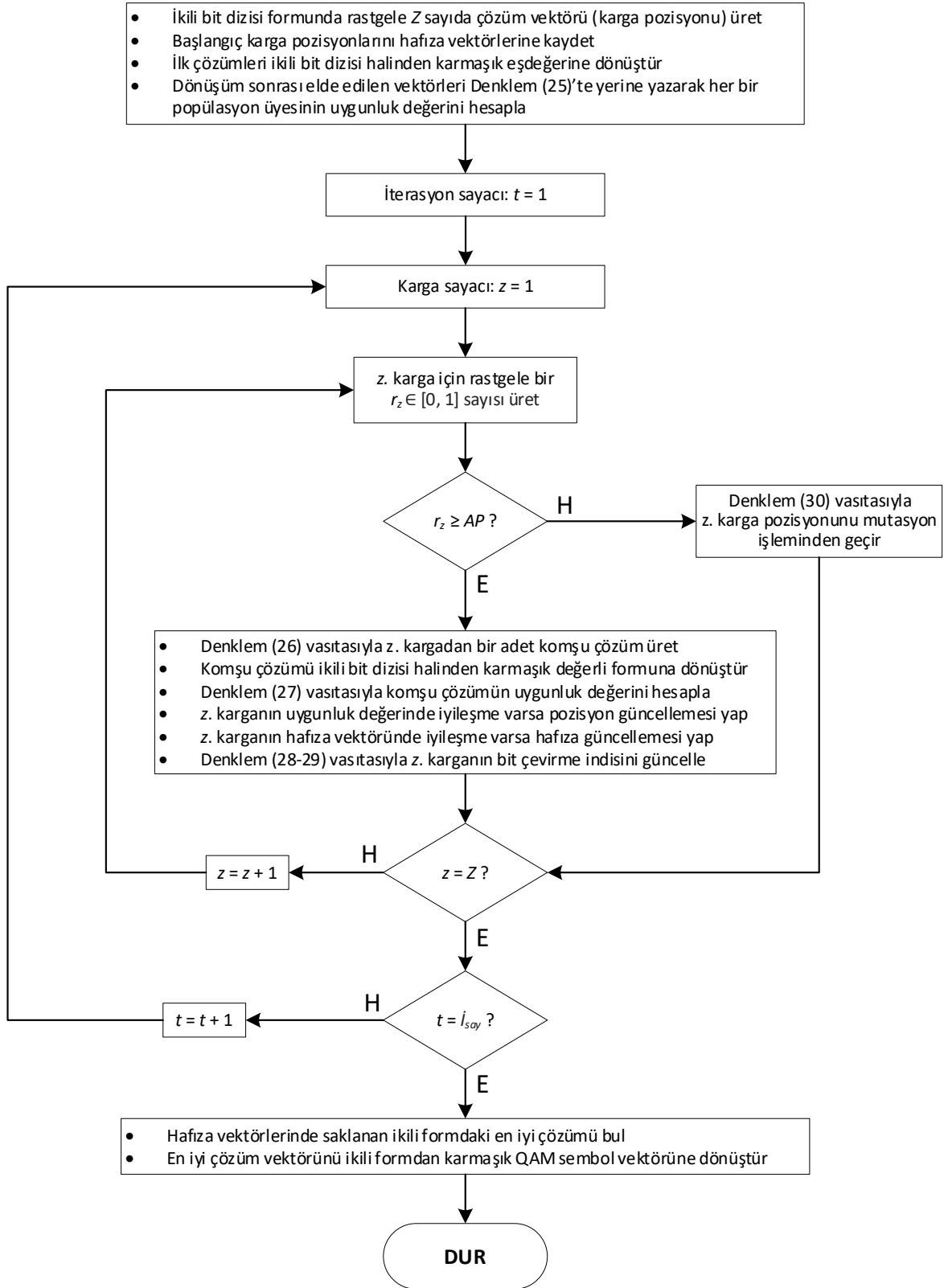
$$c_z = c_z + 1 \quad (28)$$

$$c_z = \text{mod}(c_z - 1, k \cdot A_T) + 1 \quad (29)$$

Adım 5: $r_z < AP$ ise, z 'inci karga pozisyonuna aşağıdaki mutasyon operatörü uygulanır:

$$b_z^{(j),\text{mutant}} = \text{mut}_{1 \leq j \leq k \cdot A_T}(b_z^{(j)}, NB) \quad (30)$$

Denklem (30)'da verilen mutasyon operatörü, $1 \leq j \leq k \cdot A_T$ aralığında rastgele belirlenen NB adet ikili biti 0'dan 1'e ya da 1'den sıfıra dönüştürmektedir.



Şekil 1. DCSA-ML prosedürünün akış şeması.

Adım 6: Adım 3 – Adım 5 arası işlemler her bir popülasyon üyesi için tekrarlanarak ilk iterasyon tamamlanır. İlgili adımlar arasındaki işlemlerin Z kere tekrar edilmesinin, DCSA-ML yönteminin tek bir iterasyonuna karşılık geldiği hesaba katılarak, önceden belirlenmiş olan maksimum iterasyon sayısına (t_{say}) ulaşıncaya kadar optimizasyon işlemine devam edilir. Durdurma kriteri sağlandıktan sonra, hafıza vektörlerinde saklanan en düşük uygunluk değerine sahip karga pozisyonu, ikili formdaki optimum sembol vektörü olarak tayin edilir. Sembol algılama işlemini tamamlamak için, ikili bitlerden oluşan söz konusu sembol vektörü, eşdeğeri olan karmaşık QAM sembol dizisine dönüştürülür. Şekil 1’de DCSA-ML prosedürünün akış diyagramı verilmiştir.

6. Simülasyon Sonuçları

Bu bölümde, önerilen DCSA-ML ve ele alınan diğer sembol algılama stratejilerinin MIMO-FBMC/OQAM alıcısında QAM sembol dizilerini elde etmedeki başarıları test edilmiştir. Bu amaçla, söz konusu yöntemlerin 4×4 , 6×6 ve 8×8 MIMO konfigürasyonlarındaki bit hata oranı başarımları karşılaştırılmıştır. Bunun yanı sıra, ilgili sembol algılama stratejilerinin optimum çözüme yakınsama yetenekleri, her birinin yakınsama eğrisi elde edilerek birbirleriyle kıyaslanmıştır. Simülasyonlarda kullanılan sistem parametreleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Simülasyonlar için belirlenen parametre değerleri.

Filtre türü	PHYDYAS
FBMC sembollerinin sayısı	$T = 30$
QAM yıldız kümesi boyutu	$Q = 4$
Alt taşıyıcıların frekans aralığı	15 KHz
Örtüşme katsayısı	4
Anten yapısı	4×4 , 6×6 , 8×8
Taşıyıcı frekansı	2.5 GHz
Kanal türü	SUI-6
Alt taşıyıcı sayısı	$N = 64$
Kestirim hatası oranı	$e = 25\%$

Tablo 2’de, ML tabanlı stratejilerin araştırma karmaşıklığı (AK) üzerine bir analiz gerçekleştirilmiştir. Geleneksel ML yöntemi için araştırma karmaşıklığı tanımı, sembol algılama işlemi boyunca gerçekleştirilen Öklid hesabı sayısı dikkate alınarak yapılmaktadır. Metasezgisel yaklaşımlara dayanan modifiye edilmiş ML varyantlarının araştırma karmaşıklıklarında ise, her biri tek bir Öklid hesabına karşılık gelen uygunluk değerlendirmelerinin sayısı hesaba katılmaktadır. Buna göre, söz konusu ML varyantlarının araştırma karmaşıklığını tanımlamak için tek yapılması gereken, sembol optimizasyonu süresince gerçekleştirilen uygunluk değerlendirmelerinin toplam sayısını belirlemektir. Bu bağlamda, DCSA-ML stratejisinin optimizasyon periyodu boyunca kaç adet uygunluk değerlendirmesi gerçekleştirdiğini elde ederek ilgili yöntemin araştırma karmaşıklığını tanımlayabiliriz. DCSA-ML yönteminin her bir iterasyonunda, mevcut popülasyonda yer alan her bir karga için bir adet uygunluk değerlendirmesi gerçekleştirilmektedir. Buna göre, toplam karga sayısını maksimum iterasyon sayısı ile çarpacak olursak, DCSA-ML stratejisinin araştırma karmaşıklığını $AK = Z \cdot I_{\text{say}}$ şeklinde elde ederiz. disABC-ML yönteminin araştırma karmaşıklığı, aynı yol izlenerek $AK = R \cdot D_{\text{say}}$ şeklinde elde edilir. DBHS-ML yönteminde, her bir araştırmada tek bir uygunluk hesabı gerçekleştirildiğinden dolayı, ilgili yöntemin araştırma karmaşıklığı, Tablo 2’de gösterildiği gibi direk olarak optimizasyon süresi boyunca gerçekleştirilen toplam araştırma sayısına eşit olacaktır.

Sinyal iletimi için daha yüksek anten konfigürasyonu kullanımı, optimum sonuca yakınsayabilmek için çok daha yoğun bir şekilde taranması gereken daha geniş bir arama uzayına yol açmaktadır. Bu nedenle, daha yüksek bir MIMO konfigürasyonu, metasezgisel algoritmalara dayalı ML stratejilerinin her biri için hem daha fazla sayıda araştırma sayısı hem de fazladan popülasyon üyeleri gerektirmektedir. Bu gereksinimi karşılamak için, DCSA-ML yönteminin 4×4 , 6×6 ve 8×8 anten konfigürasyonlarındaki araştırma karmaşıklıkları sırasıyla 150, 375 ve 860 olarak belirlenirken, DBHS-ML ve disABC-ML yöntemlerinin aynı MIMO yapıları için araştırma karmaşıklıkları 220, 750 ve 1800 değerlerine eşitlenmiştir. Aynı şekilde, 4×4 ’ten 8×8 ’e kadar artırılan söz konusu anten yapıları için, DCSA-ML prosedüründeki karga popülasyonunun büyüklüğü 10, 15 ve 20 olarak ayarlanırken, DBHS-ML ve disABC-ML yöntemlerindeki popülasyon boyutları sırasıyla 20, 30 ve 40 şeklinde belirlenmiştir. Araştırma karmaşıklığı ile bit hata oranı başarımları arasında bir ödünleşim olduğu unutulmamalıdır. Önerilen DCSA-ML stratejisi için en uygun araştırma karmaşıklığı değerlerini belirlerken, bu ödünleşim dikkate alınmıştır. Örneğin, MIMO-FBMC/OQAM sisteminde tatmin edici BER sonuçlarına ulaşmak için DCSA-ML dedektörü tarafından ihtiyaç duyulan uygunluk hesabı sayıları, söz konusu ödünleşim göz önünde bulundurularak sırasıyla 150, 375 ve 860 olarak belirlenmiştir. Fazladan uygunluk değerlendirmeleri, DCSA-ML yönteminin BER performansında kayda değer bir iyileşme sağlamadığından dolayı, 150, 375 ve 860 olarak belirlenen söz konusu uygunluk değerlendirme sayılarındaki herhangi bir artış, önerilen yöntemin araştırma karmaşıklığında gereksiz bir büyümeye yol açacaktır. Metasezgisel tabanlı ML dedektörlerinde, uygunluk hesabı sayısının direkt olarak araştırma karmaşıklığını belirlediği unutulmamalıdır. Diğer taraftan DBHS-ML ve disABC-ML yöntemlerinin, optimizasyon süreci boyunca çok daha fazla sayıda uygunluk hesabı yapmasına müsaade edilerek çözüm uzayını daha çok araştırmalarına fırsat tanınmıştır. Rakiplerine göre dezavantajlı bir pozisyona düşürülmesine rağmen, önerilen DCSA-ML stratejisi, her

bir anten konfigürasyonu için optimuma en yakın BER seviyesine ulaşarak DBHS-ML ve disABC-ML dedektörlerini geride bırakmayı başarmıştır. Bu çalışmada ele alınan zeki optimizasyona dayalı ML dedektörlerinin diğer parametre değerleri Tablo 3'te gösterilmektedir.

Tablo 2. Makalede ele alınan ML tabanlı sembol dedektörleri için araştırma karmaşıklığı analizi.

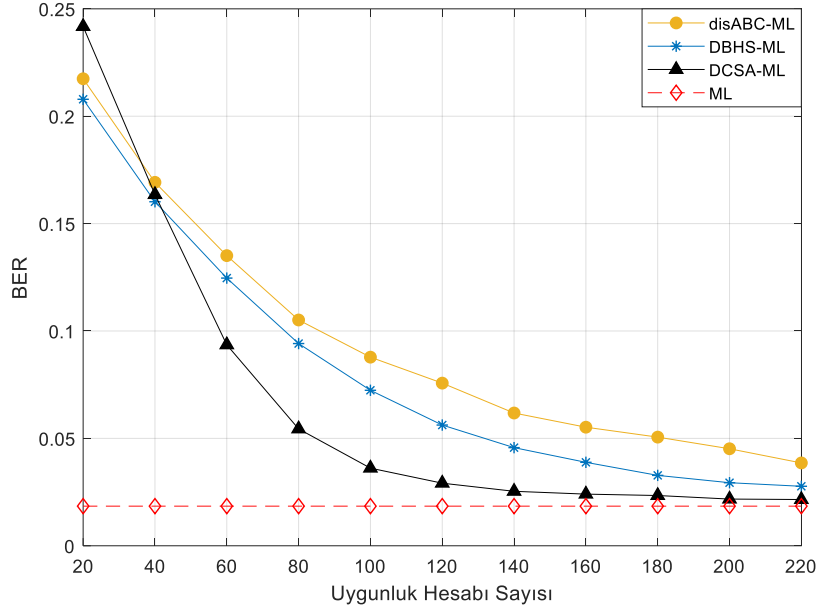
Sembol Algılama Prosedürleri		4×4	6×6	8×8
disABC-ML	Koloni boyutu	$R = 20$	$R = 30$	$R = 40$
	Döngü sayısı	$D_{say} = 11$	$D_{say} = 25$	$D_{say} = 45$
	Araştırma karmaşıklığı	$AK = R \cdot D_{say} = 220$	$AK = R \cdot D_{say} = 750$	$AK = R \cdot D_{say} = 1800$
	12 dB SNR için BER	0.03857	0.02942	0.01783
DBHS-ML	Popülasyon boyutu	$Pop = 20$	$Pop = 30$	$Pop = 40$
	Araştırma sayısı	$A_{say} = 220$	$A_{say} = 750$	$A_{say} = 1800$
	Araştırma karmaşıklığı	$AK = A_{say} = 220$	$AK = A_{say} = 750$	$AK = A_{say} = 1800$
	12 dB SNR için BER	0.02770	0.02109	0.01123
DCSA-ML	Karga sayısı	$Z = 10$	$Z = 15$	$Z = 20$
	İterasyon sayısı	$I_{say} = 15$	$I_{say} = 25$	$I_{say} = 43$
	Araştırma karmaşıklığı	$AK = Z \cdot I_{say} = 150$	$AK = Z \cdot I_{say} = 375$	$AK = Z \cdot I_{say} = 860$
	12 dB SNR için BER	0.02471	0.02049	0.006142
ML	Araştırma karmaşıklığı	$AK = Q^{Ar} = 4^4 = 256$	$AK = Q^{Ar} = 4^6 = 4096$	$AK = Q^{Ar} = 4^8 = 65536$
	12 dB SNR için BER	0.01845	0.01118	0.002702

Tablo 3. Zeki optimizasyon tabanlı sembol algılama stratejilerine ait parametre değerleri.

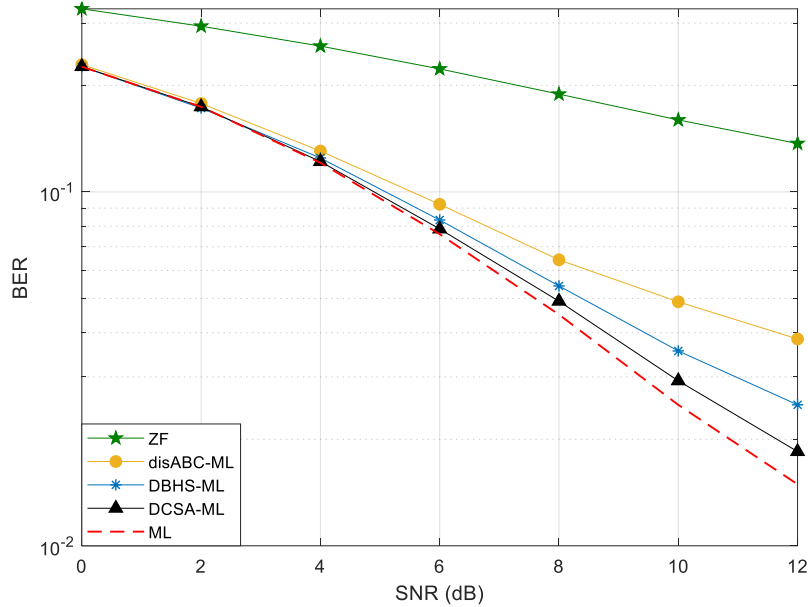
Strateji	Parametre	Değer
DCSA-ML	Farkındalık olasılığı	$AP = 0.05$
	Mutasyona uğratılacak bit sayısı	$NB = 3$
DBHS-ML	Ton ayarlama oranı	$PAR = 0.05$
	Harmoni hafızasını kullanma oranı	$HMCR = 0.6$
disABC-ML	Maksimum deneme sayısı	30

Şekil 2'de, çalışmada ele alınan zeki optimizasyona dayalı modifiye edilmiş ML stratejilerinin yakınsama kabiliyetleri, 4×4 anten konfigürasyonlu MIMO-FBMC/OQAM sisteminde teste tabi tutulmuştur. Söz konusu yakınsama analizinde, sistemin SNR değeri 12 dB'ye ayarlanmıştır. Şekilden de açıkça görüleceği üzere, DBHS-ML ve disABC-ML yöntemlerinin optimum BER seviyesine yaklaşımları için 220 adet uygunluk hesabı bile yeterli olmazken, önerilen DCSA-ML stratejisinin yakınsama eğrisi sadece 150 uygunluk değerlendirmesi sonucu neredeyse bu seviyeye örtüşmektedir. Örneğin DBHS-ML ve disABC-ML dedektörleri, sırasıyla 0.02770 ve 0.03857 BER değerlerine ulaşabilmek için 220 adet uygunluk değerlendirmesine ihtiyaç duymaktadırlar. Öte yandan, üst düzey yakınsama kabiliyeti sayesinde, DCSA-ML dedektörü aynı BER seviyelerine sadece 128 ve 97 uygunluk değerlendirme sayıları ile ulaşabilmektedir. Bunun haricinde, önerilen strateji ile 220 uygunluk hesabı boyunca optimizasyon işlemine devam etmenin gereksiz olduğu Şekil 2'den de açıkça görülmektedir. Bu durum göz önüne alınarak, DCSA-ML sembol dedektörünün maksimum uygunluk hesabı sayısı 150'ye ayarlanmıştır.

Şekil 3'te, önerilen DCSA-ML stratejisi, ZF ve ML gibi geleneksel yöntemler de dahil olmak üzere çalışmada ele alınan diğer sembol dedektörlerinin her biri ile 4×4 MIMO-FBMC/OQAM sistemindeki BER performansı bakımından karşılaştırılmıştır. Şekilden de kolaylıkla anlaşılacağı üzere DCSA-ML yöntemi, bit hata oranı seviyesi olarak alt sınıra en çok yaklaşan yöntem olmuştur. En yakın takipçisi olarak göze çarpan DBHS-ML dedektörüne sembol algılama işlemi sırasında 70 adet daha fazla uygunluk hesabı gerçekleştirme fırsatı verilmesine rağmen, önerilen DCSA-ML prosedürü söz konusu metasezgisel tabanlı rakibine göre daha düşük BER değerlerine ulaşmıştır.

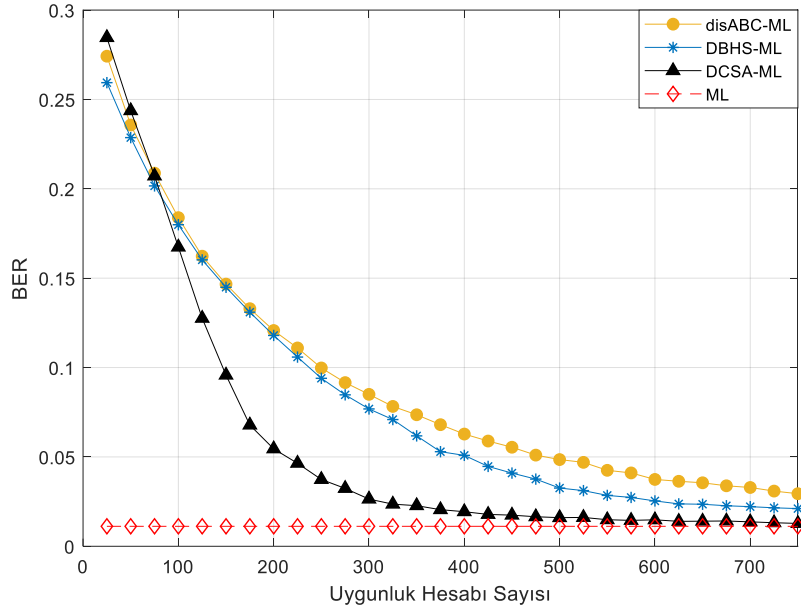


Şekil 2. Zeki optimizasyon tabanlı ML stratejilerinin 4x4 anten konfigürasyonu için yakınsaklık analizi.



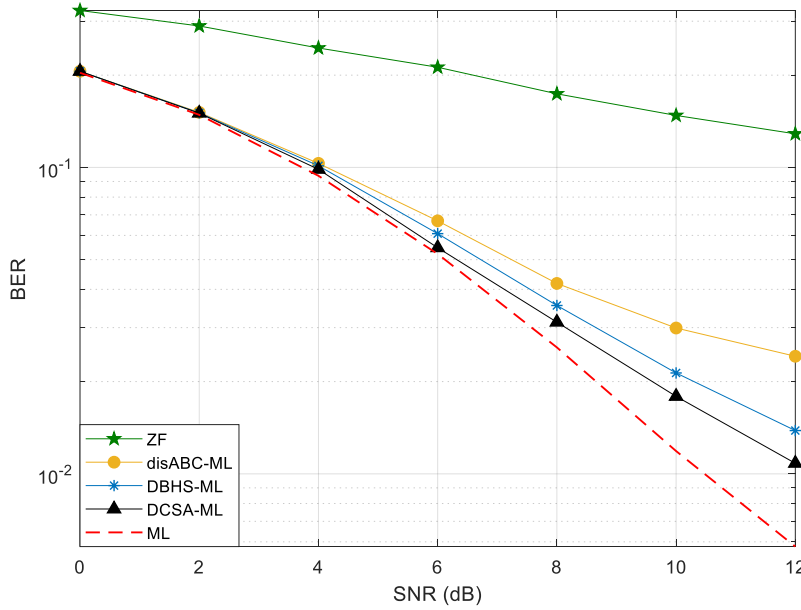
Şekil 3. Sembol algılama stratejilerinin 4x4 anten konfigürasyonu için bit hata oranı başarımları.

Sembol algılama stratejilerinin daha geniş bir araştırma uzayındaki yakınsama davranışlarını incelemek için, MIMO-FBMC/OQAM sisteminin anten konfigürasyonu 4x4'ten 6x6'ya yükseltilmiştir. Anten sayısındaki söz konusu artışın ardından, metasezgisel algoritmaya dayanan her bir sembol dedektörünün yakınsama eğrisi Şekil 4'te elde edilmiştir. Daha büyük anten konfigürasyonlarında daha yüksek sayıda uygunluk değerlendirmesine duyulan ihtiyaç, Şekil 2 ve Şekil 4'te sırasıyla 4x4 ve 6x6 anten konfigürasyonları için elde edilen yakınsama eğrilerinden rahatlıkla anlaşılabilir. Bunun haricinde, Şekil 4'ten de açıkça görüleceği üzere, önerilen DCSA-ML stratejisi oldukça başarılı bir yakınsama performansı göstermektedir. Önerilen yöntemin DBHS-ML ve disABC-ML dedektörlerini tam olarak geride bırakması için sadece 84 adet uygunluk hesabı yeterli olmuştur. Bu noktadan itibaren, optimum çözüme hızla yakınsamaya devam ederek, diğer yöntemler ile arasındaki farkı daha da açmıştır. Şekil 4'ten de açıkça görüleceği üzere, 375. uygunluk değerlendirmesinden itibaren, DCSA-ML yönteminin yakınsama eğrisinde önemli bir gelişim gözlenmemektedir. Bu yüzden, gereksiz işlem yükünden kaçınmak amacıyla, DCSA-ML dedektörünün maksimum uygunluk hesabı sayısı, 6x6 MIMO yapısı için 375 olarak tayin edilmiştir.



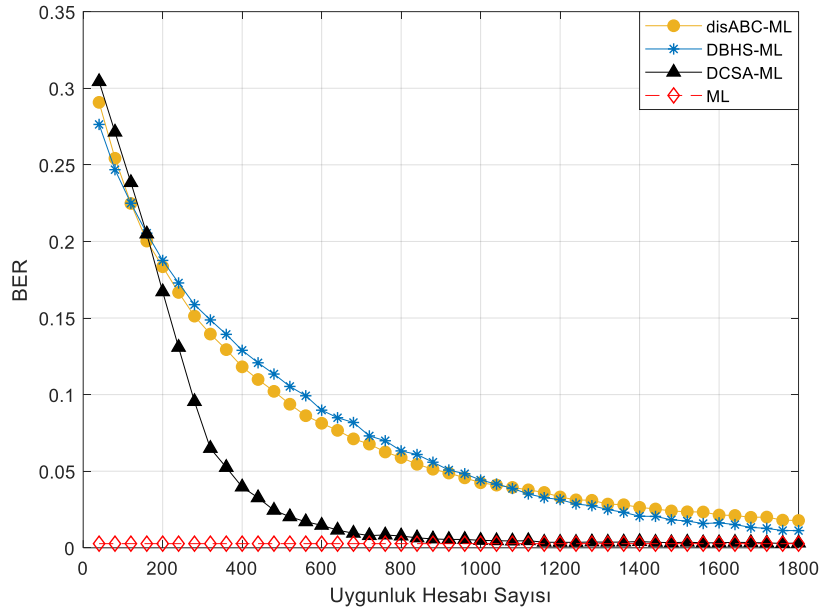
Şekil 4. Zeki optimizasyon tabanlı ML stratejilerinin 6x6 anten konfigürasyonu için yakınsaklık analizi.

Şekil 5'te, 4x4'ten 6x6'ya anten artışının DCSA-ML ve diğer karşılaştırma yöntemleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, 6x6 MIMO-FBMC/OQAM sistemi için her bir sembol algılama stratejisinin bit hata oranı eğrisi elde edilmiştir. Verici ve alıcı anten sayılarındaki artış, önerilen DCSA-ML stratejisinin ZF, DBHS-ML ve disABC-ML dedektörlerine oranla optimuma daha yakın BER değerleri elde ederek üstünlüğünü korumasına engel olamamıştır. Örneğin, 10 dB SNR değerindeki BER sonuçları dikkate alınacak olursa, geleneksel ML yöntemine ait optimum BER seviyesi 1.19×10^{-2} değerine eşit olurken, önerilen DCSA-ML stratejisi 1.79×10^{-2} BER değerine ulaşarak optimuma yakın bir sonuç elde etmiştir. İlgili SNR değerinde DBHS-ML ve disABC-ML yöntemleri, sırasıyla 2.13×10^{-2} ve 3×10^{-2} seviyelerine ancak ulaşabilmişlerdir.



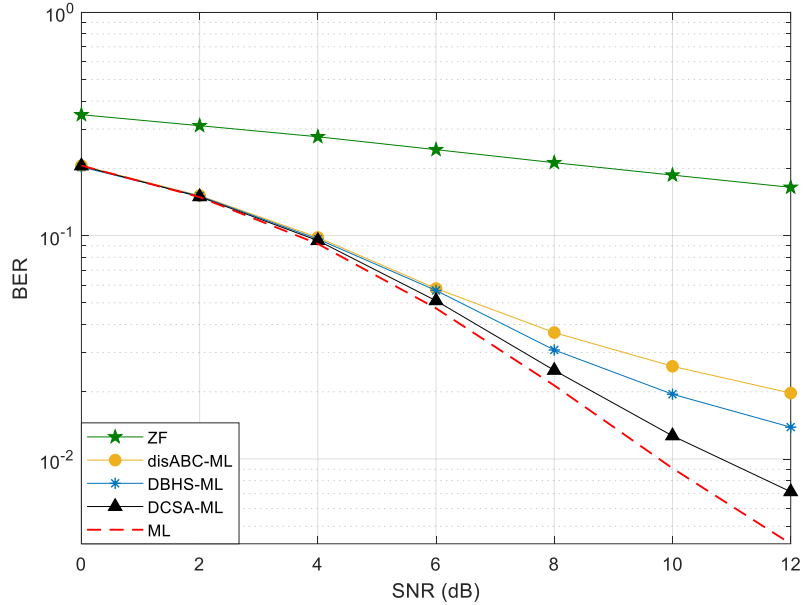
Şekil 5. Sembol algılama stratejilerinin 6x6 anten konfigürasyonu için bit hata oranı başarımları.

Şekil 6'da zeki optimizasyon tabanlı gelişmiş ML dedektörleri, 8x8 gibi daha da yükseltilmiş bir anten konfigürasyonuna sahip MIMO-FBMC/OQAM sistemindeki yakınsama hızlarına göre karşılaştırılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi, önerilen DCSA-ML stratejisi üstün yakınsama kabiliyetini 8x8 anten konfigürasyonunda da göstermiştir. Önerilen sembol algılama yöntemi, DBHS-ML ve disABC-ML dedektörlerini yaklaşık olarak 170. uygunluk hesabında geçtikten sonra optimum çözüme doğru hız kesmeden yakınsamaya devam ederken diğer yöntemler, yetersiz yakınsama performanslarından dolayı optimum bit hata oranı seviyesinden oldukça uzakta kalmışlardır. DCSA-ML dedektörünün optimuma yakın bir çözüme ulaşması için yaklaşık 860 adet uygunluk hesabı yeterli gelmiştir, bu nedenle 860'dan 1800'e kadar 940 adet gereksiz uygunluk hesabından kaçınmak için, maksimum uygunluk değerlendirme sayısı 860 olarak belirlenmiştir.



Şekil 6. Zeki optimizasyon tabanlı ML stratejilerinin 8x8 anten konfigürasyonu için yakınsaklık analizi.

Anten konfigürasyonunu 6x6'dan 8x8'e yükselterek çalışmada ele alınan sembol algılama stratejileri için işleri daha da zorlaştırdıktan sonra, ilgili stratejilerin 8x8 MIMO-FBMC/OQAM sistemindeki bit hata oranı başarımları Şekil 7'de karşılaştırılmıştır. Söz konusu anten artışından dolayı araştırma uzayına meydana gelen önemli genişlemeye rağmen, önerilen DCSA-ML stratejisi, sahip olduğu özel yakınsama yeteneği sayesinde bit hata oranı performansı bakımından DBHS-ML ve disABC-ML metotları ile arasındaki mesafeyi daha da açmıştır. Öte yandan, diğer yöntemlerin yakınsama hızları, simülasyonlarda 940 adet daha fazla uygunluk hesabı yapmalarına izin verilmesine rağmen DCSA-ML dedektörünün BER sonuçlarına yaklaşabilmeleri için yeterli olmamıştır.



Şekil 7. Sembol algılama stratejilerinin 8x8 anten konfigürasyonu için bit hata oranı başarımları.

7. Sonuç

Bu çalışmada, karga arama algoritmasının oldukça nitelikli bir ayrık varyantı (DCSA) sembol optimizatörü olarak kullanılmak üzere klasik ML yöntemine entegre edilerek MIMO-FBMC/OQAM sistemi için DCSA-ML isimli yeni ve modern bir sembol algılama stratejisi geliştirilmiştir. Sonrasında bu strateji, MIMO-FBMC/OQAM sistemindeki bit hata oranı başarımları bakımından çeşitli anten konfigürasyonları için teste tabi tutulmuştur. Önerilen DCSA-ML stratejisinin ilgili sistemdeki bit hata oranı başarımlarını ölçerek sembol algılama performansını değerlendirirken, geleneksel ML ve ZF sembol dedektörlerinin yanı sıra, DBHS-ML ve disABC-ML isimli gelişmiş ML varyantları karşılaştırma amaçlı kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları, önerilen DCSA-ML stratejisinin üstün performansını açık bir şekilde ortaya koymuştur. Çalışmada ele alınan sembol dedektörlerinin bit hata oranı analizlerinden de anlaşılacağı üzere önerilen strateji, her bir anten yapısı için optimuma en yakın BER seviyelerine ulaşarak, sadece

klasik ZF dedektöründen daha iyi sembol algılama performansı sergilemekle kalmayıp, kendisiyle aynı kategoride yer alan DBHS-ML ve disABC-ML isimli modern rakiplerini de geride bırakmıştır.

Kaynakça

- [1] Nissel, R., Schwarz, S., Rupp, M. 2017. Filter bank multicarrier modulation schemes for future mobile communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34(10), 1768-1782.
- [2] Farhang-Boroujeny, B. 2014. Filter bank multicarrier modulation: A waveform candidate for 5G and beyond. *Advances in Electrical Engineering*, 2014(1), 1-25.
- [3] Cimini, L. J. 1985. Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing. *IEEE Transactions on Communications*, 33(7), 665-675.
- [4] Peng, Y., Alexandropoulos, G. C., Li, Y. 2016. Pilot-assisted channel estimation with MSE-optimal thresholding for OFDM systems. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 27(8), 1055-1070.
- [5] Zakaria, R., Le Ruyet, D. 2010. On maximum likelihood MIMO detection in QAM-FBMC systems. 21st Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 26-30 September, Istanbul, Turkey, 183-187.
- [6] Nissel, R., Blumenstein, J., Rupp, M. 2017. Block frequency spreading: A method for low-complexity MIMO in FBMC-OQAM. *IEEE 18th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, 03-06 July, Sapporo, Japan, 1-5.
- [7] Spencer, Q. H., Swindlehurst, A. L., Haardt, M. 2004. Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 52(2), 461-471.
- [8] Zhu, X., Murch, R. D. 2002. Performance analysis of maximum likelihood detection in a MIMO antenna system. *IEEE Transactions on Communications*, 50(2), 187-191.
- [9] Şimşir, Ş., Taşpınar, N. 2023. A powerful PTS strategy boosted by a novel discrete crow search algorithm for reducing the PAPR of UFMC signals. *Journal of Electrical Engineering*, 74(3), 197-209.
- [10] Askarzadeh, A. 2016. A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: Crow search algorithm. *Computers & Structures*, 169, 1-12.
- [11] Kong, X., Gao, L., Ouyang, H., Li, S. 2015. A simplified binary harmony search algorithm for large scale 0-1 knapsack problems. *Expert Systems with Applications*, 42(12), 5337-5355.
- [12] Cheng, X., Liu, D., Feng, S., Pan, Q., Fang, H. 2018. PTS based on DisABC algorithm for PAPR reduction in OFDM systems. *Electronics Letters*, 54(6), 397-398.
- [13] Khan, A. A., Bashir, S., Naeem, M., Shah, S. I., Li, X. 2008. Symbol detection in spatial multiplexing system using particle swarm optimization meta-heuristics. *International Journal of Communication Systems*, 21(12), 1239-1257.
- [14] Seyman, M. N. 2022. Symbol detection based on back tracking search algorithm in MIMO-NOMA systems. *Computer Systems Science & Engineering*, 40(2), 795-804.
- [15] Li, L., Meng, W., Ju, S. 2016. A novel artificial bee colony detection algorithm for massive MIMO system. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 16(17), 3139-3152.
- [16] Mandloi, M., Bhatia, V. 2016. A low-complexity hybrid algorithm based on particle swarm and ant colony optimization for large-MIMO detection. *Expert Systems with Applications*, 50, 66-74.
- [17] Seyman, M. N., Taşpınar, N. (2013). Symbol detection using the differential evolution algorithm in MIMO-OFDM systems. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 21(2), 373-380.
- [18] Wang, C., Au, E. K. S., Murch, R. D., Mow, W. H., Cheng, R. S., Lau, V. 2007. On the performance of the MIMO zero-forcing receiver in the presence of channel estimation error. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 6(3), 805-810.
- [19] Nguyen, T. T., Lampe, L. 2008. On partial transmit sequences for PAR reduction in OFDM systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7(2), 746-755.

Yüksek Hızlarda Doğrusal Katılaştırma Sonucu Zn-Al Ötektik Alaşımının Mikroyapı ve Mikrosertlik Özelliklerindeki Değişimlerin İncelenmesi

Ümit BAYRAM*, 1, 2

*1 Abdullah Gül Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı (AGU-CRF), Kayseri, Türkiye

*2 Erciyes Üniversitesi, Nanoteknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (ERNAM), Kayseri, Türkiye

(Alınış / Received: 08.07.2024, Kabul / Accepted: 01.08.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.08.2024)

Anahtar Kelimeler

Doğrusal Katılaştırma,
Zn-Al Alaşımı,
Mikroyapı,
Mekanik Özellikler.

Öz: İnşaat sektöründeki çelik sacların kaplaması ve işlenebilir fabrikasyon parçalarının üretimi gibi çok geniş bir uygulama alanında aktif olarak kullanılan Zn-%5.0 Al (ağ.%) ötektik alaşımının faz diyagramı üzerinde bileşenin belirlenmesi sonrasında doğrusal olarak katılaştırma deneyleri, sabit sıcaklık gradyanında ($G=4.25$ K/mm) ve geniş bir katılaştırma hızı aralığında ($V=8.25-2032.19$ $\mu\text{m/s}$) Bridgman tipi katılaştırma fırını ile gerçekleştirildi. Karakterizasyon çalışmaları için SEM (Taramalı Elektron Mikroskopu) ve SEM-EDX (Enerji Dağıtıcı X-Işını Spektroskopisi) kullanıldı ve mikrosertlik (HV) değerleri Future-Tech FM-700 model mikrosertlik cihazı kullanılarak elde edildi. Düşük ($V=8.25-165.68$ $\mu\text{m/s}$), yüksek ($V=516.23-2032.19$ $\mu\text{m/s}$) ve tüm ($V=8.25-2032.19$ $\mu\text{m/s}$) katılaştırma hızı değerlerinin (V) hem ötektik mesafe (λ) ve hem de mikrosertlik (HV) üzerine olan etkisi lineer regresyon analizi ile ayrı ayrı hesaplanarak araştırılmıştır. Artan katılaştırma hızı (V) değerlerine bağlı olarak ötektik mesafe (λ) değerleri azalma ve mikrosertlik (HV) değerleri ise artma eğilimi göstermektedir. Çalışmanın tüm sonuçları literatürdeki benzer hız aralıklarına sahip deneysel çalışmalar ve Jackson-Hunt ötektik teorisi ile karşılaştırıldı. Sonuç olarak, Jackson-Hunt ötektik teorisinin, standart katılaştırma hızı aralığını ($\sim V=7.5-300.0$ $\mu\text{m/s}$) aşan yüksek katılaştırma hızlarına uygulanmadığı, ayrıca alaşımın 350.0 $\mu\text{m/s}$ civarında ötektik teoriden uzaklaşmaya başladığı kritik katılaştırma hızına sahip olabileceği ifade edildi.

Investigation of Changes in Microstructure and Microhardness Properties of Zn-Al Eutectic Alloy as a Result of Directionally Solidification at High Velocities

Keywords

Directional Solidification,
Zn-Al Alloy,
Microstructure,
Mechanical Properties.

Abstract: After determining its component on the phase diagram of the Zn-5.0% Al (wt.%) eutectic alloy, which is actively used in a wide range of application areas such as coating of steel sheets in the construction industry and the production of machinable fabricated parts, directional solidification experiments were carried out at a constant temperature gradient ($G=4.25$ K/mm) and an extensive growth rate range ($V=8.25-2032.19$ $\mu\text{m/s}$), using a Bridgman type solidification furnace. SEM (Scanning Electron Microscope) and SEM-EDX (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy) were used for characterization studies, and microhardness (HV) values were obtained using the Future-Tech FM-700 model microhardness device. The effect of low ($V=8.25-165.68$ $\mu\text{m/s}$), high ($V=516.23-2032.19$ $\mu\text{m/s}$) and all ($V=8.25-2032.19$ $\mu\text{m/s}$) growth rate values (V) on both eutectic distance (λ) and microhardness (HV) was investigated by calculating them separately with linear regression analysis. Depending on the increasing growth rate (V) values, eutectic distance (λ) values tend to decrease and microhardness (HV) values tend to increase. All results of the study were compared with experimental studies with similar rate ranges in the literature and the Jackson-Hunt eutectic theory. In conclusion, it was stated that the Jackson-Hunt eutectic theory could not be applied to high growth rates exceeding the standard solidification rate range ($\sim V = 7.5-300.0$ $\mu\text{m/s}$) and that the alloy may have a critical solidification rate around 350.0 $\mu\text{m/s}$, where it begins to move away from the eutectic theory.

*İlgili Yazar, email: umit.bayram@agu.edu.tr

1. Giriş

Çinko-Alüminyum (Zn-Al) alaşımları farklı mikroyapısal davranışlarının yanı sıra yüksek ısı direnci, aşınma direnci ve mukavemeti özellikleri ile birçok inşaat, havacılık ve otomotiv endüstrisi gibi çok geniş yapısal uygulama alanlarında döküm alaşımları olarak kullanılmaktadır [1-4]. Zn-Al alaşımlarının teknolojik olarak ilgi çekici mikro yapıya sahip olmalarının bir sonucu olarak, bu alaşımların yüksek mukavemet, sertlik, preslenebilirlik ve fabrikasyon parçalara ideal bir alternatif olması gibi çeşitli özellik ve işleme avantajları nedeniyle dökme demir, bronz ve alüminyumla rekabet edebilir duruma getirmektedir [5-6]. Bu alaşımlar çeşitli mühendislik uygulamalarında maliyet etkisi, çevre dostu olması ve enerji verimliliğine katkı sağlamaları nedeniyle son yıllarda demirli ve demirsiz alaşımların yerine geçebilecek alaşımlar olarak giderek daha fazla ilgi görmektedir [7-9]. Yaygın olarak kullanılan alüminyum, bakır ve demir bazlı diğer döküm alaşımlarına göre birçok avantajının olduğu bilinmektedir. Alüminyumdan daha sert ve güçlü olmaları, bakırdan çok daha ucuz olmaları ve işlenebilirliklerinin dökme demirden daha iyi olmaları bahsedilen avantajlara örnek olarak verilebilir [10]. Ayrıca, bütün Zn-Al alaşımları, standart çinko alaşımlarına kıyasla yüksek sıcaklıklarda üstün bir korozyon direnci ve performans sunar, bu sayede rulman özelliklerinin önemli olduğu yerlerde uygulanabilir [11-14].

Doğrusal (tek yönlü) katılaştırma üzerine ilk çalışmanın 1960'lı yıllarda türbin kanatlarının üretilmesi için yapılmasından sonra [15], bu metot yalnızca belirli teknolojik alaşımların üretim ve geliştirilmesinde değil, son yıllarda araştırmacıların ikili ve çoklu alaşımların [16-28] üretimi için teorik ve deneysel çalışmaların da merkezinde yer almaktadır. Bu yöntem, alaşımların mikro yapıları, geometrik yapıları ve üretim koşulları arasındaki ilişkiyi anlamak ve ortaya çıkarmak için önemli bir araçtır. Katılaşıma sırasında çekirdeklenme ve büyüme hızlarının kontrolü, katı malzemenin tane boyutu ve şekliyle homojenliğini sağlar. Aynı şekilde, katılaştırma hızının kontrolü, saflaştırma sürecine katkı sağlar. Ayrıca, katılaşıma mekanizmasının bilinmesi, malzemelerin termal, elektriksel ve mekanik özelliklerinin doğrudan kontrol edilmesine katkıda bulunur [16,17,29].

Ötektik alaşımlar, araştırmacılar ve döküm endüstrisi tarafından tercih edilen temel alaşımlardır, çünkü üstün döküm yetenekleri ve mekanik özelliklerinin yanı sıra düşük erime noktalarına sahiptirler [30-32]. Bridgman tipi kontrollü katılaştırma tekniği, ötektik alaşımların yönlü katılaştırması (kristal büyümesi) için kullanılan ana tekniklerden biridir. Çinko ve alüminyum esaslı alaşımların hacim küçültme sırasında oluşturduğu gerilmeler nedeniyle oluşan distorsiyon ve çatlaklar gibi istenmeyen döküm kusurları, literatürdeki çalışmalarda [33-34] ayrıntıları verilen Bridgman tipi kontrollü katılaştırma tekniği kullanılarak minimum seviyelere indirilebilmektedir.

Literatürde ikili ötektik alaşımlar üzerine yapılan çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre [35-42], doğrusal katılaştırma ile ilgili çalışmalar çoğunlukla $\sim 7.5\text{--}300.0 \mu\text{m/s}$ katılaştırma hızı aralığına sahip Bridgman tipi kontrollü katılaştırma ekipmanı kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, deney sonuçlarından katılaştırma parametrelerinin (Co, G, V) belirlenmesi sonrasında, katılaştırma hızının mikroyapı, elektriksel ve mekaniksel özellikler üzerine olan etkisi incelenmiştir. Buradan yola çıkarak doğrusal katılaştırma çalışmalarında $450.0 \mu\text{m/s}$ 'den daha yüksek bir katılaştırma hızı ile kontrollü katılaştırmanın sağlanmasının daha zor olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle, mevcut çalışmanın amacı, Zn-%5.0 Al (ağ.%) ötektik alaşımı için, sabit sıcaklık gradyanında ($G=4.25 \text{ K/mm}$), hem yüksek ($V=516.23\text{--}2032.19 \mu\text{m/s}$) hem de literatürdeki standart katılaştırma hızı aralığında ($V=8.25\text{--}165.68 \mu\text{m/s}$) deneysel çalışmaları gerçekleştirmek ve her bir katılaştırma hızı aralığına bağlı olarak ötektik mesafe (λ) ve mikrosertlik (HV) değerlerindeki değişimin ilişkisini lineer regrasyon analizi kullanarak ortaya çıkarmaktır. Ötektik yapının tercih edilmesi ile öncelikle alaşımda ortaya çıkan mikroyapı düzenindeki değişim gözlenecek, sonrasında ise mikroyapıdaki mevcut değişimin alaşımların mikrosertliğine olan etkisi incelenecektir.

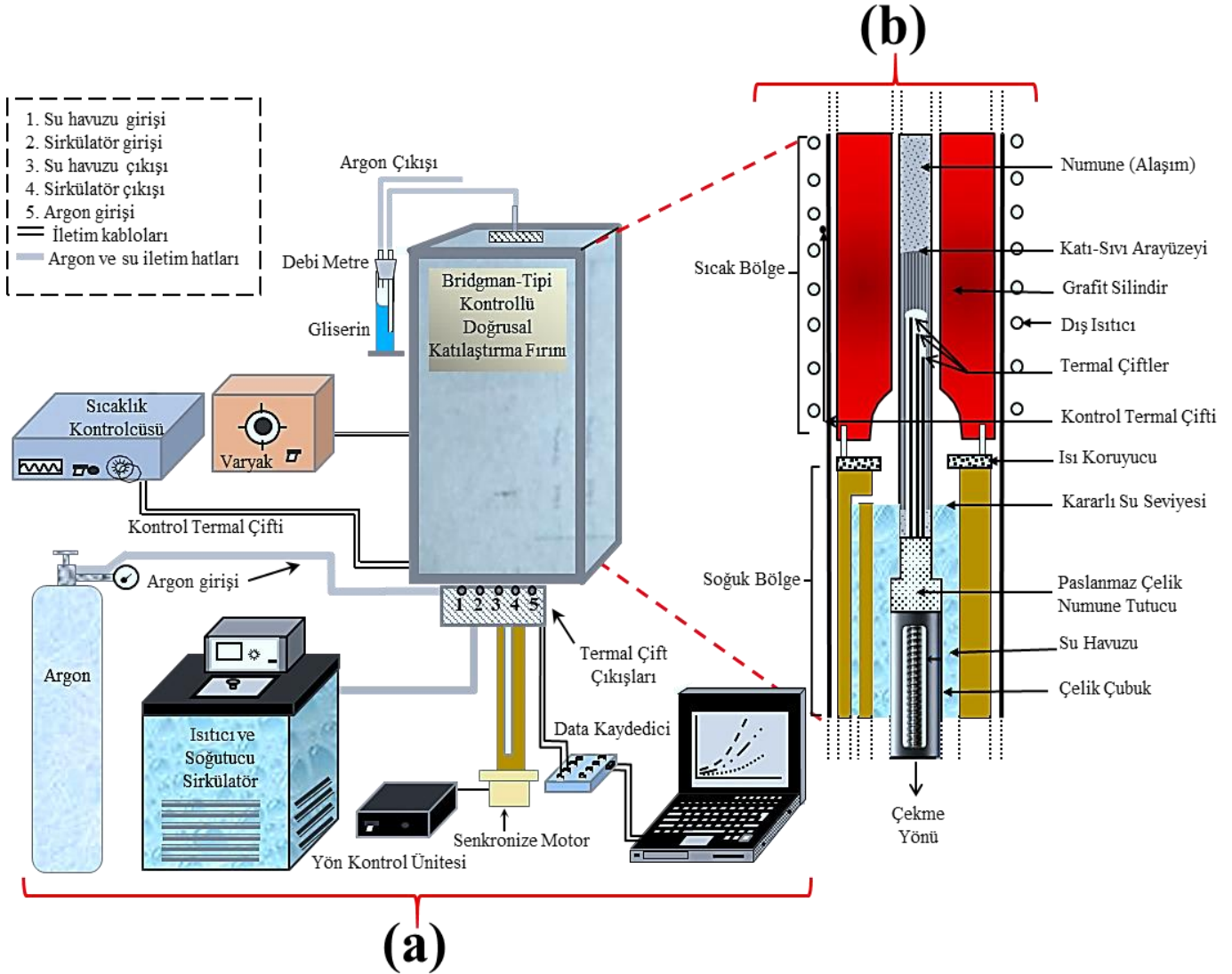
2. Materyal ve Metot

Bu çalışmadaki deneysel süreçlerin büyük bir kısmı alaşım hazırlama, doğrusal katılaştırma deneylerinin yapımı, mikroyapıyı gözlemlene, ötektik lamelsel mesafeler (λ) ve katılaştırma parametrelerinin (G ve V) ölçümü aşamalarını kapsamaktadır. Diğer önemli bir kısım ise alaşımların mekanik özelliklerinden biri olan mikrosertlik (HV) ölçümlerinin yapılmasıdır.

2.1. Homojen alaşım üretimi ve doğrusal katılaştırma deneyleri

Deneysel sürecinin ilk aşamasında, arayüzey yapısının bozulmaması ve safsızlıkların arayüzeyde birikmemesi için ötektik alaşımların üretilmesinde yüksek saflığa sahip malzemeler (Alfa Aesar marka - %99.99 saf alüminyum ve %99.95 saf çinko), Zn-%5.0 Al (ağ.%) ötektik alaşımı için hesaplanan miktarlarda $\pm 0.1 \text{ mg}$ duyarlılık ile ölçüm

yapan hassas terazi ile tartıldı. Erime boyunca metallerin oksitlenmesini engellemek ve homojen alaşım oluşumunu sağlamak amacıyla malzemeler vakumlu eritme fırını içerisinde eritildi. Yüksek erime sıcaklığı, metalik malzemelerle tepkiye girmemesi ve en önemlisi de kolay işlenebilir olması gibi özellikleri nedeniyle bu çalışmadaki tüm deneysel çalışmalarda (karıştırıcı çubuk, numune kalıbı, döküm potası) Morgan marka grafit kullanıldı. Daha sonra alaşımın erime sıcaklığının ($\sim 385^{\circ}\text{C}$) yaklaşık 100°C üzerinde olan başka bir özel tasarım döküm fırınında önceden hazırlanmış grafit numune potalarına (dış çap: 6.35 mm, iç çap: 4 mm, uzunluk: 200 mm) döküldü. Eriyik alaşım, döküm boşluğunun oluşmaması için potaların içerisini tamamen doldurulacak şekilde yönlendirilerek 15 dakikalık periyotlar ile grafit çubuk kullanılarak katılaştırıldı. Böylelikle eş zamanlı olarak aynı alaşım ile bütün numune potalarının dolması sağlandı ve numuneler kontrollü katılaştırma deneylerine hazır hale getirildi.



Şekil 1.(a) Deney düzeneğinin blok diyagramı, (b) Bridgman-tipi kontrollü doğrusal katılaştırma fırınının detayları, (c) Farklı senkron motorlar, (d) Yüksek katılaştırma hızları için tasarlanan motor-çekme sistemi.

Deneylelerin ikinci aşamasında, elde edilen her numune üst kısmında koruyucu bir grafit silindir (dış çap: 40 mm, iç çap: 10 mm, uzunluk: 300 mm) bulunan Bridgman tipi katılaştırma fırınına konuldu, blok diyagram ve ayrıntılar Şekil 1.a ve 1.b'de verilmiştir. Numunelerin doğrusal olarak katılaştırma deneyleri, farklı çekme hızlarına sahip senkron motorlar (Şekil 1.c) ve yüksek katılaştırma hızlarına ulaşmak için özel olarak tasarlanan bir çekme motoru (Şekil 1.d) kullanılarak (Şekil G=4.25 K/mm sabit sıcaklık gradyanında ve 8.25 $\mu\text{m/s}$ 'den 2032.19 $\mu\text{m/s}$ 'e kadar geniş bir katılaştırma hızı aralığında gerçekleştirildi.

Genel olarak deneylerde kullanılan senkron motorların çekme hızları 1 ($\sim 8 \mu\text{m/s}$), 2 ($\sim 16 \mu\text{m/s}$), 5 ($\sim 40 \mu\text{m/s}$), 10 ($\sim 80 \mu\text{m/s}$), 20 ($\sim 160 \mu\text{m/s}$) ve 60 rpm ($\sim 480 \mu\text{m/s}$)'dir ve en yüksek çekme hızındaki senkron motor ile (60 rpm) elde edilebilecek maksimum katılaştırma hızı yaklaşık değeri 450.0–500.0 $\mu\text{m/s}$ 'dir. Bu doğrultuda amaçlanan yüksek katılaştırma hızlarına ulaşmak için, bir el matkabı motoru modifiye edilerek farklı bir motor-çekme sistemi tasarlandı (Şekil 1.d). Tablo 1'de, tasarlanan motor-çekme sistemi ile yapılan katılaştırma deneyleri sonucunda hesaplanmış, uygulanan gerilimlere karşı çekme hızları ve aynı zamanda çekme hızlarına karşılık gelen katılaştırma hızı değerleri gösterilmiştir. Alaşım numunelerinin üretilmesinden, Şekil 1'de verilen deneysel prosedürler ve hesaplamalar ile Bridgman tipi katılaştırma fırınına ait bilgilere kadar pek çok teknik bilgi önceki çalışmalarda detaylı olarak verilmiştir [16,17].

Tablo 1. Yüksek katılaştırma hızları elde etmek için dizayn edilen sürücü sistemiyle uygulanan gerilimlere karşı motor çekme hızları ve alaşım üzerinde ölçülen katılaştırma hızı değerleri.

Uygulanan Gerilim (DC Volts)	Motor Çekme Hızı ($\mu\text{m/s}$)	Katılaştırma Hızı ($\mu\text{m/s}$)
1.0	987.48	516.23
2.1	2059.23	992.75
3.0	3127.65	1544.51
3.8	4074.12	2032.19

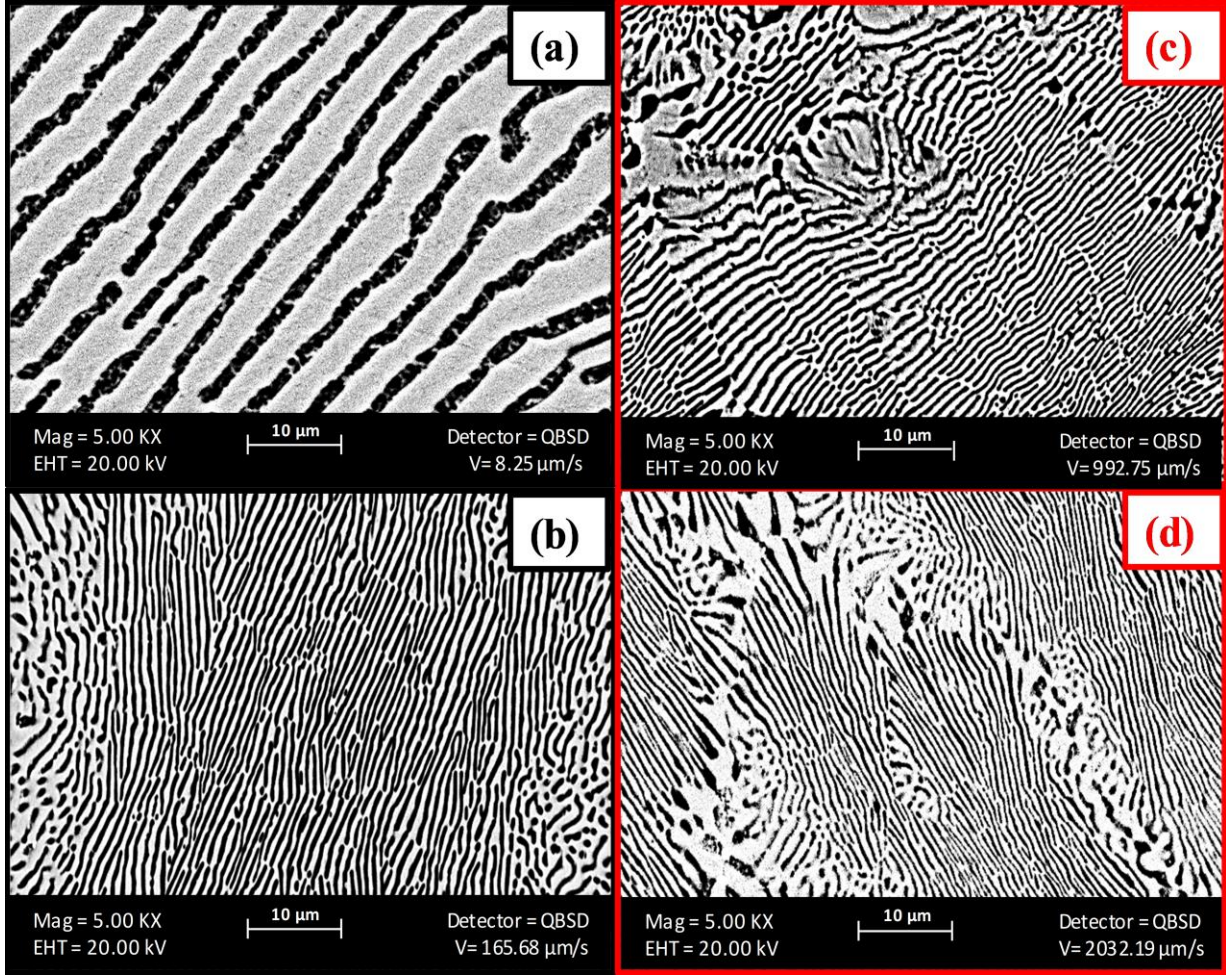
Katılaştırma fırını içerisinde ~ 10 cm kadar katılaştırılan örnek, sıcaklık gradyanını oluşturmak için tasarlanan iç su havuzunun bulunduğu soğuk bölgeye çekilerek quench denilen ani soğutma işlemi ile katılaştırılmıştır. Dikkatli bir şekilde grafit potalardan çıkarılan tüm örneklerin arayüzeyini tespit etmek amacıyla, SiC kağıdı (120, 320, 500, 1000, 2000 grit) ile bir yüzeyi boyunca önce zımparalandı ve daha sonra parlatıldı. Arayüzeyin bulunduğu boyuna kesitler ve arayüzeye yakın olabilecek yerdeki enine kesitler uygun mesafelerde kesildi. Sonrasında metalografik işlemler için bu kesitler 7/1 oranı ile hazırlanan epoksi ve sertleştirici kimyasalları kullanılarak kalıplanması yapıldı. Otomatik parlatma robotu (Struers TegraPol-15) ile parlatma ve zımparalama işlemlerinin tamamlanması sonrasında mikroyapıya ait özellikleri gözlemlemek için kimyasal dağlama işlemi uygulandı. Son olarak, Zn-%5.0 Al (ağ.%) ötektik alaşımı, 90 ml su ve 10 ml hidroflorik asit (%10 HF) ile karıştırılarak elde edilmiş çözeltiye 35–40 saniye boyunca daldırılarak dağlandı ve mikroyapıların ortaya çıkması sağlandı.

2.2. Mikroyapının gözlemlenmesi ile ötektik lamelsel mesafeler (λ) ve katılaştırma parametrelerinin ölçümleri (G ve V)

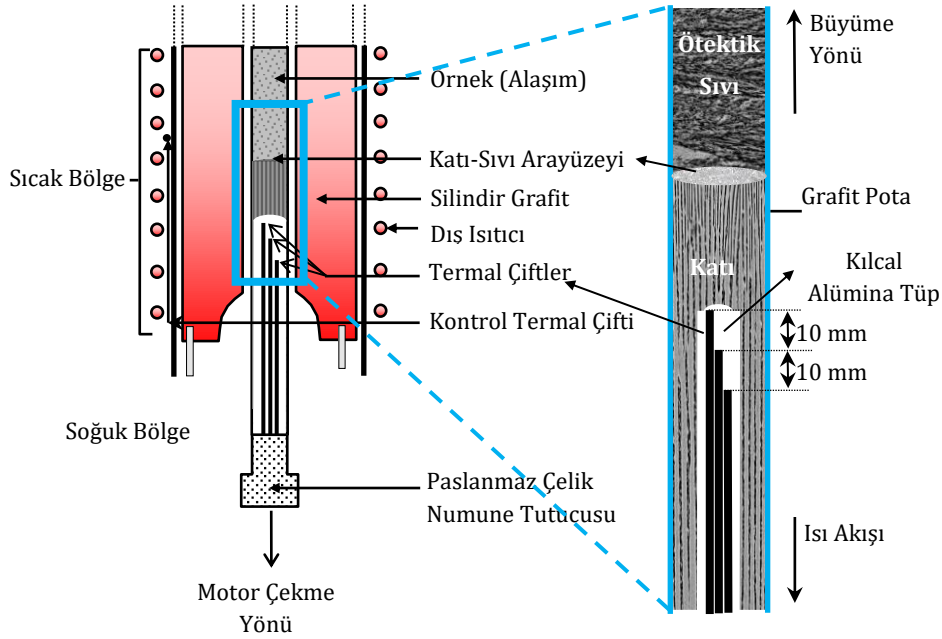
Bu çalışmadaki numunelerin karakterizasyon çalışmaları aşamasında, oluşan mikro yapı görüntüleri, hem faz tanımlamasını hem de bileşimi belirlemek amacıyla SEM (Taramalı Elektron Mikroskopu-Zeiss GeminiSEM 300) ve SEM-EDX (Enerji Dağıtıcı X-Işını Spektroskopisi) ile çekildi. Zn-%5.0 Al (ağ.%) ötektik alaşımı için doğrusal katılaştırılmış örneklerde hem düşük hem de yüksek katılaştırma hızlarına ait bazı mikroyapı resimleri Şekil 2'de verilmiştir. SEM cihazı ile görüntüleme yapmadan önce, örnekler Quorum-Q150R Plus marka kaplama cihazı içerisine konularak 10 nm tabaka kalınlığına sahip altın (Au) tabaka ile kaplanmıştır. Bu işlemin amacı, elektron demetinin yüzeyden daha verimli şekilde saçılmasını sağlamak ve görüntü çözünürlüğünü artırmaktır.

Alaşım içindeki sıcaklıkları ölçmek için grafit pota içerisine önceden yerleştirilen ve kılcal seramik alümina tüp ile yalıtılmış olan üç adet K-tipi termal çiftin Bridgman tipi kontrollü katılaştırma fırını ve numune içerisindeki konumu Şekil 3'te gösterilmektedir. Bu termal çiftler 10 mm aralıklarla sabitlenmiş ve 0,25 mm çapına sahiptir. Bilgisayara bağlı data kaydedici ile katı-sıvı arayüzeyi ikinci termal çiftte olduğunda, birinci ve ikinci termal çift arasındaki sıcaklık farkı (ΔT) ve katı-sıvı arayüzeyinin Şekil 3'te görseli verilen mesafelerle (ΔX) ayrılmış termal çiftlerden geçmesi için geçen süre (Δt) okundu. Her numune için ayrı ayrı kaydedilen ΔT , ΔX ve Δt değerleri kullanılarak, katılaştırma hızı ($V = \Delta X / \Delta t$) ve sıcaklık gradyanı ($G = \Delta T / \Delta X$) değerleri belirlendi. Fırının sıcak bölgesi

ile soğuk olan bölgesi ve aralarındaki mesafe sabit tutulduğu için katı-sıvı ara yüzeyindeki sıcaklık gradyan değeri (G) katılaştırma deneyleri boyunca sabit tutulabildi. G ve V'nin hesaplanması ile Δt , ΔX ve ΔT değerlerinin elde edilmesinin detayları ilgili kaynaklardaki çalışmalarda verilmektedir [16,17].



Şekil 2. Doğrusal olarak katılaştırılan Zn-%5.0 Al (ağ.%) ötektik alaşımı için enine kesitlerden alınan bazı SEM görüntüleri.

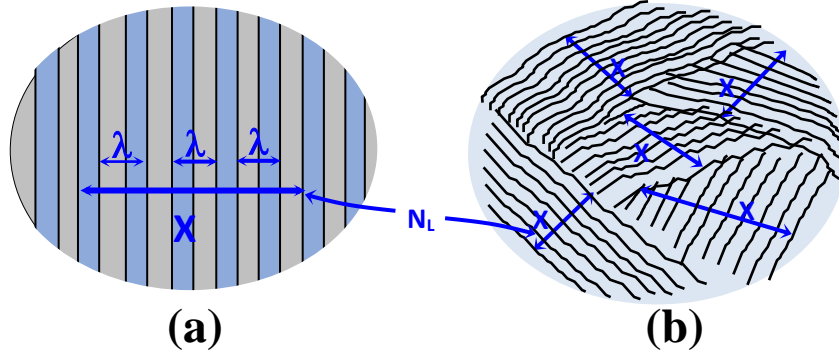


Şekil 3. Kontrollü katılaştırma fırını içerisinde konulan numune yapısı ve ayrıntıları.

Düşük katılaştırma hızları (λ_D), yüksek katılaştırma hızları (λ_Y) ve tüm katılaştırma hızları için (λ_T) lamelsel yapıdaki ötektik mesafe değerleri en az 5 farklı bölgeden 50 ölçüm yapılarak enine kesite (çekme yönüne dik) ait SEM görüntülerinden elde edilmiştir. Bu görüntülerin kullanılmasındaki odaklanılan önemli nokta; katılan örnek yüzeyi üzerinde mevcut lamelsel yapıların tamamının gözlenebilmesi sebebiyle enine kesitlerden alınan ölçümler boyuna kesitlerde yapılan ölçümlerden daha güvenilir olmasıdır. Enine kesitleri alınan örneklerin Şekil 4'te şematik gösterimi verilen linear kesişim (linear intercept) metodu [43] yardımıyla, SEM görüntüleri üzerinden Image ProPlus programı kullanılarak birbirini tekrar eden düzenli yapılardaki lamelsel yapıların toplam genişliği ölçüldü. Ötektik lamelsel mesafeler (λ), aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplandı:

$$\lambda = \frac{X}{N_L - 1} \quad [1]$$

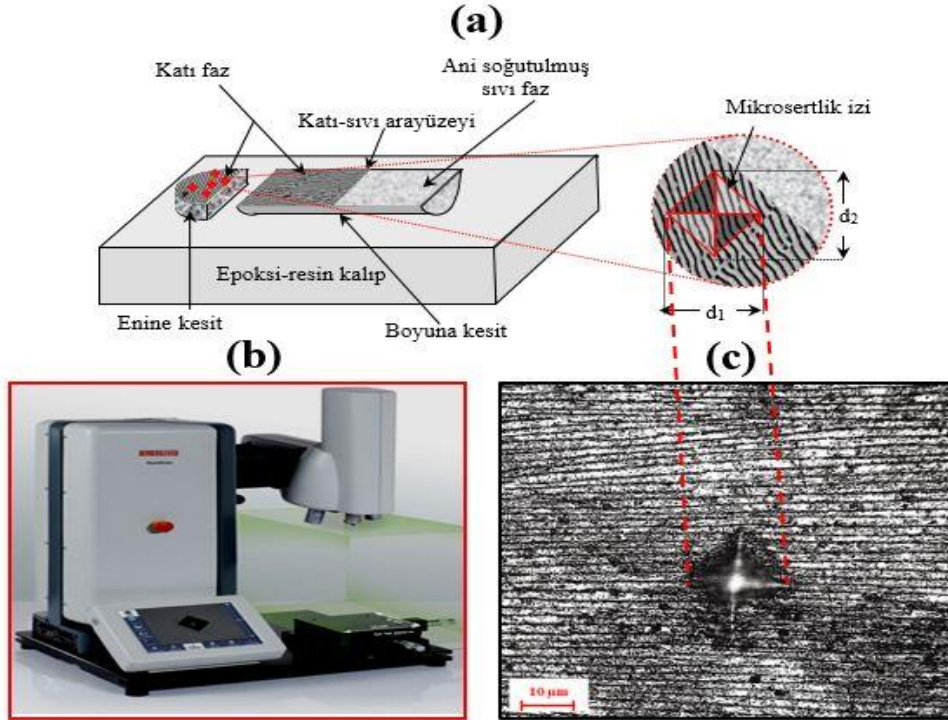
Burada, N_L ; ölçüme dahil edilen lamel sayısı, X ; toplam lamel genişliğidir.



Şekil 4. Ötektik alaşımın enine kesiti üzerinde dar (a) ve geniş (b) bölgeler için lamelsel mesafelerin ölçümü şematik gösterimi.

2.3. Mikrosertlik sonuçlarının elde edilmesi

Bu çalışmada katılaştırma hızına bağlı olarak mikroyapıdaki değişimin aynı zamanda Zn-%5.0 Al (ağ.%) ötektik alaşımın mikrosertliğine olan etkisini de ortaya çıkarmak amacıyla, mikrosertlik değerleri Vickers-sertlik ölçüm cihazı (Future Tech FM-700) kullanılarak elde edildi.



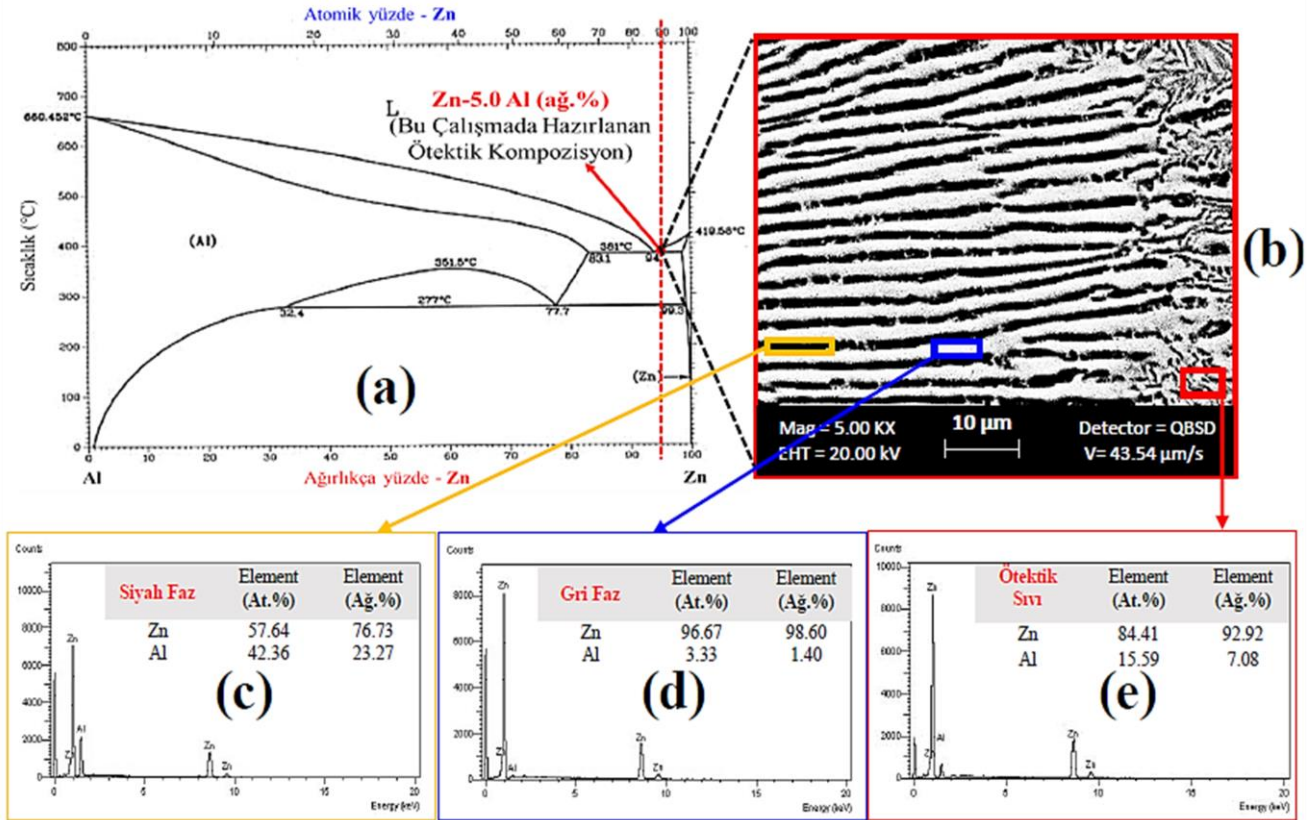
Şekil 5. (a) Cihazın numune üzerinde bıraktığı izin detayları, (b) Mikrosertlik ölçüm cihazı fotoğrafı, (c) Doğrusal katılaşmış ötektik Zn-5.0 Al (ağ.%) alaşımına ait optik mikroskop ile çekilen örnek sertlik iz görüntüsü.

Şekil 5.a'dan örneğin enine kesiti üzerinde alınan sertlik ölçümünün bıraktığı izin detayları ve Şekil 5.b'de ise kullanılan cihazın fotoğrafı verilmiştir. Ölçümü kolay ve basit olan bu yöntemde, sekiz farklı katılaştırma hızında katılaştırılmış örnekler üzerine 10 sn süresince 500 g yük uygulanmış ve ortaya çıkan 20-50 μm 'lik iz görüntülerinden mikrosertlik değerleri cihaz aracılığıyla tespit edilmiştir. Şekil 5.c'de optik mikroskop ile çekilen örnek sertlik iz görüntüsü verilmiştir. Ölçüm güvenilirliği göz önünde bulundurularak, bu işlem farklı bölgelerden 25 kez tekrar edilmek suretiyle ortalama değerler alınarak gerçekleştirildi.

3. Bulgular

3.1. Mikroyapının değerlendirilmesi ve fazların karakterizasyonu

Bu çalışmanın temel amacı, Zn-Al ötektik alaşımında, düşük ($V_{DKH}=8.25-165.68 \mu\text{m/s}$), yüksek ($V_{YKH}=516.23-2032.19 \mu\text{m/s}$) ve tüm ($V_{TKH}=8.25-2032.19 \mu\text{m/s}$) katılaştırma hızı değerlerinin (V) hem ötektik mesafe (λ_{DKH} , λ_{YKH} , λ_{TKH}) ve hem de mikrosertlik (HV_{DKH} , HV_{YKH} , HV_{TKH}) üzerine olan etkisini lineer regrasyon analizi ile ortaya koymaktır. Bu doğrultuda alaşımın çalışılması hedeflenen ötektik noktadaki doğru kompozisyonunu belirlemek amacıyla, Massalski [44] tarafından belirlenen Zn-Al alaşımına ait faz diyagramı (Şekil 6.a) dikkate alındı ve bu faz diyagramında alaşım sisteminin tek bir ötektik nokta içerdiği görülmektedir. Çalışılmak için seçilen ötektik nokta ve reaksiyon denklemi şu şekildedir: Zn-%5.0 Al (ağ.%), E: $L \leftrightarrow (\mu\text{-Zn}) + (\alpha\text{-Al})$. Katı-sıvı arayüzeyi de içeren Şekil 6. b'de görüldüğü gibi, ötektik alaşım ile yapılan doğrusal katılaştırma çalışmaları sonucunda faz diyagramından tanımlanan her bir faz birbirinden ayrılmış ve bu fazların kantitatif kimyasal bileşim analizleri SEM-EDX ile kullanılarak yapılmıştır. Şekil 6.c ve 6.d'deki sonuçlarda: Siyah renkli lamelsel fazın; Zn ($\eta\text{-Zn} + \alpha\text{-Al}$) çözelti fazı (Zn-%23.27 Al (ağ.%)) ve gri renkli fazın; $\eta\text{-Zn}$ çözelti fazı, Ana (matrix) faz (Zn-%1.40 Al (ağ.%)) olduğu görülmektedir. Şekil 6.d'de verilen EDX sonucu (genel) alaşımın ötektik sıvı bölgesinden alınmış ve çalışılan Zn-%5.0 Al (ağ.%) ötektik kompozisyonu ile uyumlu olarak elde edilmiştir (Zn-%7.08 Al (ağ.%)).



Şekil 6. Zn-Al ikili alaşıma ait faz diyagramı [44] (a). Ötektik alaşımda 43.54 $\mu\text{m/s}$ katılaştırma hızı ile elde edilmiş boyuna SEM görüntüsü (b). Zn-5.0 Al (ağ.%) ötektik alaşımındaki fazlara ait SEM-EDX sonuçları (c-d-e).

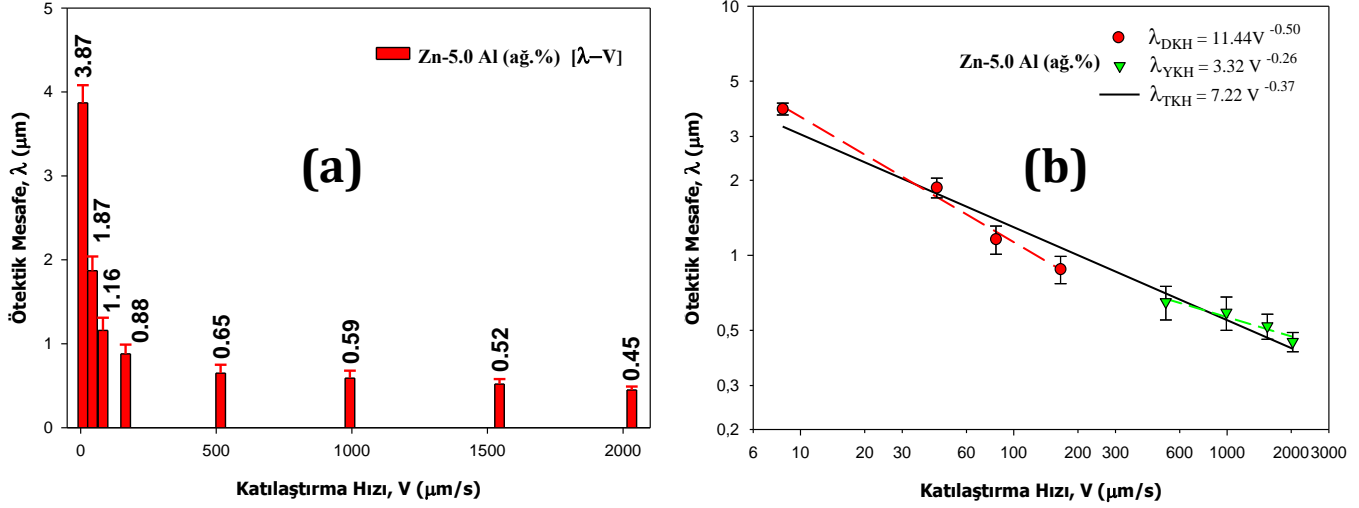
3.2. Düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızlarına bağlı olarak ötektik lamelsel mesafelerdeki (λ_{DKH} , λ_{YKH} , λ_{TKH}) ve mikrosertlik değerlerindeki (HV_{DKH} , HV_{YKH} , HV_{TKH}) değişimin incelenmesi

Şekil 2'de verilen SEM görüntülerinden anlaşılacağı gibi, katılaştırma hızındaki değişiklikler ötektik lamelsel mesafeleri önemli ölçüde etkilemektedir. Bu çalışma, sabit bir sıcaklık gradyanında ($G=4.25 \text{ K/mm}$) katılaştırma

hızlarının artmasıyla ötektik lamelsel mesafelerin azaldığı sonucuna varmıştır. En yüksek lamelsel mesafe ($3.87 \pm 0.21 \mu\text{m}$), en düşük katılaşma hızında ($8.25 \mu\text{m/s}$) elde edilirken, en düşük lamelsel mesafe ($0.45 \pm 0.04 \mu\text{m}$), en yüksek katılaşma hızında ($2032.19 \mu\text{m/s}$) ölçülmüştür. Ötektik lamelsel mesafelerin ve mikrosertlik değerlerinin logaritmik ölçekte büyüme hızı ile değişimi belirli bir katılaşma hızı değerine ($\sim 300 \mu\text{m/s}$) kadar doğrusaldır ve orantı denklemi lineer regrasyon analizi ile şu şekilde elde edilebilir:

$$\lambda = K_1 \cdot V^{-n} \text{ ve } HV = K_2 \cdot V^m \text{ (sabit } G \text{ için)} \quad [2]$$

burada, K_1 ve K_2 orantı sabitleri ve n ve m ise, katılaşma hızının üstel değeridir.



Şekil 7. Doğrusal olarak katılaşırılan Zn-5.0 Al (ağ.%) ötektik alaşımının ötektik mesafe (λ) değerlerinin katılaşma hızları (V) ile değişimi (a), düşük (DKH), yüksek (YKH) ve tüm katılaşma hızları (TKH) için elde edilen bağıntular (b).

Düşük ($V=8.25-165.68 \mu\text{m/s}$), yüksek ($V=516.23-2032.19 \mu\text{m/s}$) ve tüm ($V=8.25-2032.19 \mu\text{m/s}$) katılaşma hızları ile enine kesitten elde edilen ötektik lamelsel mesafeler arasındaki ilişkilerin sonuçları, doğrusal olarak katılaşırılmış Zn-%5.0 Al (ağ.%) ötektik alaşımı için sırasıyla aşağıdaki denklemler ile belirlendi (Şekil 7):

$$\lambda_{DKH} = 11.44 V^{-0.50} \text{ (düşük katılaşma hızları)} \quad [3a]$$

$$\lambda_{YKH} = 3.32 V^{-0.26} \text{ (yüksek katılaşma hızları)} \quad [3b]$$

$$\lambda_{TKH} = 7.22 V^{-0.37} \text{ (tüm katılaşma hızları)} \quad [3c]$$

Bu çalışmada ayrıca alaşımın mekanik özelliklerinden biri olan mikrosertlik değerleri ve katılaşma hızları arasındaki ilişkiler de lineer regrasyon analizi ile sırasıyla aşağıdaki denklemler ile tespit edildi (Şekil 8):

$$HV_{DKH} = 48.15 V^{0.10} \text{ (düşük katılaşma hızları)} \quad [4a]$$

$$HV_{YKH} = 60.03 V^{0.07} \text{ (yüksek katılaşma hızları)} \quad [4b]$$

$$HV_{TKH} = 50.98 V^{0.09} \text{ (tüm katılaşma hızları)} \quad [4c]$$

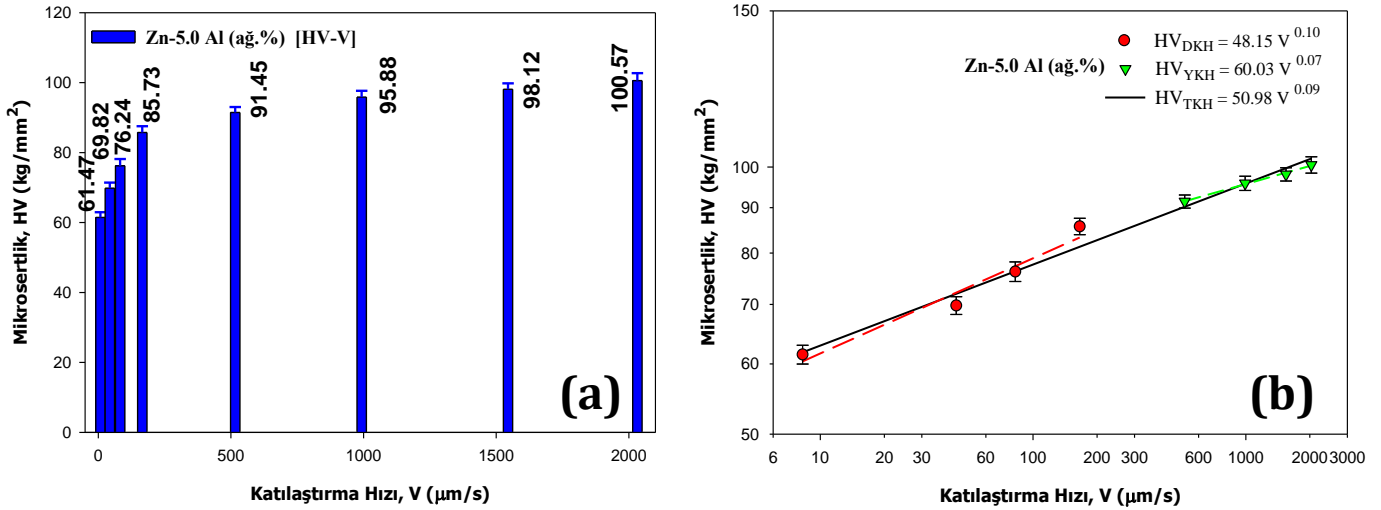
4. Tartışma ve Sonuç

Önceki çalışmalarda ötektik noktaları içeren bileşimlere sahip alaşımların standart katılaşma hızı aralığında katılaşırılmasıyla üretilen çeşitli mikroyapıları ortaya çıkarmaya yönelik birçok sonuç bulunmaktadır [35-42]. 1966 yılında Jackson ve Hunt ($\lambda^2 \cdot V = \text{Sabit}$ veya $\lambda = k \cdot V^{-0.50}$) [45] tarafından yapılan çalışma, ikili alaşım sistemlerindeki ötektik yapıyı ve bireysel fazların büyüme kinetiğini anlamamıza yardımcı olan yararlı deneysel ve teorik bulgular içermektedir.

Şekil 7'den görüldüğü gibi, bu çalışmada Zn-%5.0 Al (ağ.%) ötektik alaşımı için düşük ($V=8.25-165.68 \mu\text{m/s}$) katılaşma hızları ile elde edilen 0.50 üstel değer (λ_{DKH}), sırasıyla Gündüz vd. [36] Al-%12.6 Si (ağ.%) ($V=8.3-498.7 \mu\text{m/s}$), Kaya vd. [37] Al-%5.7 Ni (ağ.%) ($V=8.32-483.25 \mu\text{m/s}$), Koçak vd. [39] Bi-%44.8 Pb (ağ.%) ($V=7.05-113.09 \mu\text{m/s}$), Kaya vd. [41] Sn-%8.9 Zn (ağ.%) ($V=8.30-165.13 \mu\text{m/s}$), Engin ve Büyük [42] Al-%33.0

Cu (ağ.%) ($V=8.3-498.7 \mu\text{m/s}$) ötektik alaşımları için hesaplanan 0.46, 0.50, 0.49, 0.50 ve 0.54 üstel değerleriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Aynı zamanda Jackson-Hunt teorik modeli [45] tarafından öngörülen 0.50 değeri ile uyumlu olması, ötektik alaşımlar için beklendiği gibi ötektik α -Al fazlarının da artan katılaştırma hızlarıyla orantılı olarak birbirine yaklaşma eğiliminde olduğunu, diğer bir deyişle ötektik lamelsel mesafelerin giderek azaldığını göstermektedir.

Yüksek ($V=516.23-2032.19 \mu\text{m/s}$) katılaştırma hızları ile yapılan deneyler sonucunda hesaplanan 0.26 üstel değeri (λ_{YKH}), hem literatürde ikili ötektik alaşımlar için benzer çalışmalar ($\sim V=7.5-300.0 \mu\text{m/s}$) [35-42] ve hem de Jackson-Hunt [45] tarafından belirlenen 0.50 değeri ile uyumlu olmadığı ve sonuç olarak da bu değer yaklaşık yarısı kadar daha az olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu önemli farkın oluşmasını oluşturan Zn ve Al elementlerinden ziyade yüksek katılaştırma hızlarından kaynaklandığı sonucu çıkmaktadır. Yaklaşık olarak $300.0 \mu\text{m/s}$ katılaştırma hızı değerine kadar katılaştırma hızının artmasıyla ötektik lamelsel mesafenin orantılı olarak azaldığı fakat bu değeri aşan katılaştırma hızlarında tane sınırlarının görüldüğü ve bu sınırlar civarında lamelsel yapıların kalınlaştığı hatta giderek daha düzensiz bir forma girme eğiliminde oldukları görülmektedir (Şekil 2). Düşük katılaştırma hızları için ($V=8.25-165.68 \mu\text{m/s}$); senkronize motorların çekme hızlarının katılaştırma hızlarına benzer olduğu bulundu; bunun nedeni metal numune tutucunun ve grafit potanın iyi bir termal iletkenliğe sahip olması olabilir. Fakat Tablo 1'den $300 \mu\text{m/s}$ katılaştırma hızından sonraki değerlerin ($V=516.23-2032.19 \mu\text{m/s}$) çekme hızı değerlerinin yaklaşık yarısı kadar olduğu görülmektedir. Literatürde yer alan standart büyüme hızı değerleri aşıldığında karşılaşılan bu durum, çekme hızlarındaki artışa sıvı haldeki alaşım tarafından yeterince hızlı tepki verilmemesi nedeniyle mikro yapıdaki düzensizliğin de arttığını ortaya çıkarmaktadır. Deneysel sonuçlardan Zn-%5.0 Al (ağ.%) ötektik alaşımının $350.0 \mu\text{m/s}$ civarında Jackson-Hunt ötektik teorisinden [45] uzaklaşmaya başladığı kritik katılaştırma hızı olması mümkün olabilir.



Şekil 8. Doğrusal olarak katılaştırılan Zn-5.0 Al (ağ.%) ötektik alaşımının mikrosertlik (HV) değerlerinin katılaştırma hızları (V) ile değişimi (a), düşük (DKH), yüksek (YKH) ve tüm katılma hızları (TKH) için elde edilen bağıntılar (b).

Tüm katılaştırma hızları için ötektik lamelsel mesafelerin ölçümlerinden elde edilen 0.37 değeri (λ_{TKH}), standart katılaştırma hızı aralığında deneyleri gerçekleştirilen bazı üçlü ötektik alaşımların üstel değerleri ile uyumlu olduğu görüldü. Bahsedilen çalışmalarda araştırmacılar, sırasıyla Al-Cu-Mn [46], Al-Si-Co [47] ve Al-Si-Mg [48] ötektik alaşımları için sırasıyla 0.36, 0.40 ve 0.42 üstel değerlerini elde etmişlerdir. Bu uyum göz önüne alındığında şu sonuca varılabilir: Jackson-Hunt ötektik teori modeli [45], ikili ötektik alaşımlar haricindeki çoklu alaşımlar da hem yüksek katılaştırma hızlarının bir sonucu olarak üstel değerlerin 0.50 değerinden uzaklaşması ve hem de ikiden fazla materyal içeren alaşımın daha fazla düzensiz mikroyapıya sahip olması sebebiyle uygulanmadığı anlaşılmaktadır. Buradaki uyum: "İkili ötektik alaşımlar haricindeki çoklu alaşımlar da yüksek katılaştırma hızlarının bir sonucu olarak üstel değerlerin 0.50 değerinden uzaklaşması, ayrıca ikiden fazla materyal içeren bazı alaşımların düzensiz mikroyapıya sahip olmaları sebebiyle ötektik teori modelinin [45] geçerliliğini kaybetmesi" şeklinde yorumlanabilir.

Zn-%5.0 Al (ağ.%) ötektik alaşımı için elde edilen mikrosertlik değerleri, artan katılaştırma hızlarına bağlı olarak, mikroyapıdaki fazlar arasındaki mesafenin azalmasıyla birlikte beklendiği gibi artma eğilimindedir. Düşük katılaştırma hızları ($V=8.25-165.68 \mu\text{m/s}$) aralığında doğru orantılı olarak elde edilen sonuçlara göre (HV_{DKH}); en yüksek katılaştırma hızında ($165.68 \mu\text{m/s}$) en yüksek mikrosertlik değeri ($85.73 \pm 1.82 \text{ kg/mm}^2$) ve en düşük katılaştırma hızında ($8.25 \mu\text{m/s}$) en düşük mikrosertlik değeri ($61.47 \pm 1.49 \text{ kg/mm}^2$) ölçüldü. Belirlenen katılaştırma hızı aralığındaki mikrosertlik değerlerinin % 40 civarında hatırı sayılır derecede artış gösterdiği Şekil

8.a'da verilmektedir. Elde edilen 0.10 üstel değeri, literatürde daha önce benzer katılaştırma hızı aralığında yapılan çalışmalarda verilen 0.13 [38], 0.09 [49] ve 0.08 [42] üstel değerleri ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Yüksek ($V=516.23-2032.19 \mu\text{m/s}$) katılaştırma hızlarının mikrosertlik değerleri (HV_{YKH}) üzerine etkisi incelendiğinde; düşük katılaştırma hızlarında olduğu gibi nispeten daha az doğru orantılı olarak artış gösterdi. $91.45 \pm 1.56 \text{ kg/mm}^2$ ($V=516.23 \mu\text{m/s}$) değerinden yaklaşık %10'luk bir artış ile $100.57 \pm 2.13 \text{ kg/mm}^2$ ($V=2032.19 \mu\text{m/s}$) değerine çıktığı ve matematiksel olarak da üstel değer 0.07 olduğu sonucuna ulaşıldı. Tüm katılaştırma hızları ($V=8.25-2032.19 \mu\text{m/s}$) göz önüne alındığında, mikrosertlik değerleri (HV_{TKH}) için elde edilen toplam artış 0.09 üstel değeri ile yaklaşık olarak %64 civarında olduğu hesaplandı. Lamelsel mesafelerdeki değişim de olduğu gibi, katılaştırma hızları çok yüksek değerlere ulaşmasına rağmen mikrosertlik değerleri aynı oranda artış göstermedi ve giderek azalan bir artış eğilimine sahip olduğu görüldü. Diğer taraftan, literatürde yapılan deneysel çalışmalarda aynı aralıktaki katılaştırma hızları kullanılsa da mikroyapının alaşımın sahip olduğu bileşim türüne göre (ötektik üstü, ötektik altı ve ötektik gibi) ve sonuç olarak ortaya çıkan mikroyapı oluşumuna göre (flake, hücresel, lamelsel ve çubuksal gibi) değiştiği için elde edilen mikrosertlik değerleri birbirlerinden oldukça farklılık gösterebilmektedir.

Teşekkür

Araştırmacı, verdiği desteklerden dolayı çalışmanın deneysel süreçlerinin yürütüldüğü Katı Hal Fiziği-I laboratuvar sorumlusu Prof. Dr. Necmettin Maraşlı'ya teşekkür etmektedir.

Kaynakça

- [1] Gueijman, S. F., Schvezov, C. E., Ares, A. E. 2010. "Vertical and Horizontal Directional Solidification of Zn-Al and Zn-Ag Diluted Alloys." *Materials Transactions*, 51(10), 1861–1870.
- [2] Hosking, F.M., Portillo, F.F., Wunderlin, R., Mehrabian, R. 1982. "Composites of Aluminium Alloys: Fabrication and Wear Behaviour." *Journal of Material Science*, 17, 477–498.
- [3] Lee, C.S., Kim, Y.H., Han, K.S., Lim, T. 1992. "Wear Behaviour of Aluminium Matrix Composite Materials." *Journal of Material Science*, 27, 793–800.
- [4] Rhême, M., Gonzales, F., Rappaz, M. 2008. "Growth Directions in Directionally Solidified Al-Zn and Zn-Al Alloys Near Eutectic Composition." *Scripta Materialia*, 59(4) 440-443.
- [5] Osório, W.R., Freire, C.M.A., Garcia, A. 2005. "Dendritic Solidification Microstructure Affecting Mechanical and Corrosion Properties of a Zn4Al Alloy." *Journal of Material Science*, 40, 4493-4499.
- [6] Zhang, C., Wu, Y., Fang, M., Wu, S., Wei, X., Cheng, Y., Sun, Y. 1997. "Formation Mechanism of the Zn-5% Al Hot-Dip Coating Amorphous Alloys (I)." *Chinese Science Bulletin*, 42, 2067-2072.
- [7] Savaşkan, T., Turhal, M. S., Murphy, S. 2003. "Effect of Cooling Rate On Structure and Mechanical Properties of Monotectoid Zinc-Aluminium Alloys." *Materials Science and Technology*, 19 (1), 67–74.
- [8] Purcek, G., Altan, B. S., Miskioglu, I., Ooi, P. H. 2004. "Processing of Eutectic Zn–5%Al Alloy by Equal-Channel Angular Pressing." *Journal of Materials Processing Technology*, 148, 279–287.
- [9] Prasad, B. K. 2003. "Microstructural Alterations Through Heat Treatment and Its Influence On Wear Response of a Silicon Containing Zinc Based Alloy Under Different Test Conditions." *Materials Science and Technology*, 19, 327–335.
- [10] Al-Maharbi, M., Karaman, İ., Purcek, G. 2010. "Flow Response of a Severe Plastically Deformed Two-Phase Zinc-Aluminum Alloy." *Materials Science and Engineering A*, 527, 518–525.
- [11] Delneville, Ph. 1985. "Tribological Behaviour of ZnAl Alloys (ZA27) Compared with Bronze When Used as A Bearing Material with High Load and at Very Low Speed." *Wear*, 105 (4), 283-292.
- [12] Auras, R., Schvezov, C. 2004. "Wear Behavior, Microstructure, and Dimensional Stability of As-Cast Zinc-Aluminum/SiC (Metal Matrix Composites) Alloys." *Metallurgical and Materials Transactions A*, 35, 1579–1590.
- [13] Saíd, R.C. 2004. *Caracterización Mecánica Del Eutectoide Zn-Al Modificado Con Plata*, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de doctorado, pp. 12–36, México.
- [14] Boyer, H.E., Gall, T.L. 1990. *Metals Handbook*. Desk edition, American Society for Metals, USA, pp. 18–19.
- [15] VerSnyder, F.L., Guard, R.W. 1960. "Directional Grain Structure for High Temperature Strength." *Transactions of the American Society for Metals*, 52, 485-493.

- [16] Çadırılı, E., Yılmaz, İ., Şahin, M., Kaya, H. 2015. "Investigation of the Some Physical Properties of the Directionally Solidified Al-Cu-Co Ternary Eutectic Alloy." *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 68, 817-827.
- [17] Bayram, Ü. 2017. *Kontrollü Doğrusal Katılaştırılmış Alüminyum İçerikli Çoklu Ötektik Alaşımın Yapı Parametreleri ile Mekanik, Elektrik ve Termal Özelliklerinin Katılaştırma Hızına Bağlılıklarının İncelenmesi*. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, ss. 75-187, Kayseri.
- [18] Bertelli, F., Freitas, E.S., Cheung, N., Arenas, M.A., Conde, A., Damborenea, J. de, Garcia, A. 2017. "Microstructure, Tensile Properties and Wear Resistance Correlations On Directionally Solidified Al-Sn-(Cu; Si) Alloys." *Journal of Alloys and Compounds*, 695, 3621-3631.
- [19] Kakitani, R., Reyes, R.V., Garcia, A., Spinelli, J.E., Cheung, N. 2018. "Relationship Between Spacing of Eutectic Colonies and Tensile Properties of Transient Directionally Solidified Al-Ni Eutectic Alloy." *Journal of Alloys and Compounds*, 733, 59-68.
- [20] Maraşlı, N., Bayram, Ü. 2018. "Thermal Conductivity and Electrical Resistivity Dependences On Growth Rate in The Directionally Solidified Al-Cu-Ni Eutectic Alloy." *Journal of Alloys and Compounds*, 753, 695-702.
- [21] Song, Y., Turret, D., Mota, F.L., Pereda, J., Billia, B., Bergeon, N., Trivedi, R., Karma, A. 2018. "Thermal-Field Effects On Interface Dynamics and Microstructure Selection During Alloy Directional Solidification." *Acta Materialia*, 150, 139-152.
- [22] Zhao, Y., Zhang, B., Hou, H., Chen, W., Wang, M. 2019. "Phase-Field Simulation for The Evolution of Solid/Liquid Interface Front in Directional Solidification Process." *Journal of Materials Science and Technology*, 35 (6), 1044-1052.
- [23] Büyük, U., Engin, S., Kaya, H., Çadırılı, E., Maraşlı, N. 2020. "Directionally Solidified Al-Cu-Si-Fe Quaternary Eutectic Alloys." *Physics of Metals and Metallography*, 121, 78-83.
- [24] Zheng, H., Chen, R., Qin, G., Li, X., Su, Y., Ding, H., Guo, J., Fu, H. 2020. "Microstructure Evolution, Cu Segregation and Tensile Properties of Cocrfencu High Entropy Alloy During Directional Solidification." *Journal of Materials Science and Technology*, 38, 19-27.
- [25] Maraşlı, N., Bayram, Ü. 2021. "Investigations of Electrical Resistivity and Thermal Conductivity Dependences on Growth Rate in the Al-Cu-Ti Eutectic Alloy." *International Journal of Thermophysics* 42, 94.
- [26] Zhu, X., Xiao, Z., An, J., Jiang, H., Jiang, Y., Li, Z. 2021. "Microstructure and Properties of Cu-Ag Alloy Prepared by Continuously Directional Solidification." *Journal of Alloys and Compounds*, 883, 160769.
- [27] Kaygısız, Y., Palta, Ç., Kaymaz, T.Ç., Engin, S. 2023. "The Effect of Mn Addition and Heat Treatment on the Microstructure, Mechanical, and Thermophysical Properties of Al-Si-Mg Eutectic Alloy." *International Journal of Metalcasting (Technical Paper)*.
- [28] Kaygısız, Y., Palta, Ç., Engin, S. 2024. "Determination of Microstructure and Mechanical and Thermophysical Properties of Al-Si-Mg-Xcr Alloy." *Materials Chemistry and Physics*, 311, 128559.
- [29] Porter, D.A., Easterling, K.E. 1992. *Phase Transformations in Metals and Alloys*. 2nd edition. CRC Press, Boca Raton.
- [30] Kurz, W., Fisher, D.J. 1998. *Fundamentals of Solidification*, Chapter 5. 4th revised edition, Trans. Tech. Publications Ltd., Bâch, Switzerland.
- [31] Zhang, Y., Song, C., Zhu, L., Zheng, H., Zhong, H., Han, Q., Zhai, Q. 2011. "Influence of Electric-Current Pulse Treatment on the Formation of Regular Eutectic Morphology in an Al-Si Eutectic Alloy." *Metallurgical and Materials Transactions B*, 42, 604-611.
- [32] Kakitani, R., de Gouveia, G.L., Garcia, A., Cheung, N., Spinelli, J. E. 2019. "Thermal Analysis During Solidification of an Al-Cu Eutectic Alloy: Interrelation of Thermal Parameters, Microstructure and Hardness." *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 137, 983-996.
- [33] Duffar, T., Sylla, L. 2010. *Crystal Growth Processes Based on Capillarity*. Chapter 6—Vertical Bridgman Technique and Dewetting, Wiley, New York, 355-411.
- [34] Venkataraman, R. 2020. *Handbook of Radioactivity Analysis (4th edition)*. Chapter 4—Semiconductor detectors, Elsevier Inc., 458-459.
- [35] Çadırılı, E., Ülgen, A., Gündüz, M. 1999. "Directional Solidification of the Aluminium-Copper Eutectic Alloy." *Materials Transactions JIM*, 40(9), 989-996.

- [36] Gündüz, M., Kaya, H., Çadırlı, E., Özmen, A. 2004. "Interflake Spacings and Undercoolings in Al-Si Irregular Eutectic Alloy." *Materials Science and Engineering A*, 369 (1-2), 215-229.
- [37] Kaya, H., Büyük, U., Çadırlı, E., Maraşlı, N. 2010. "Unidirectional Solidification of Aluminium-Nickel Eutectic Alloy." *Kovove Materialy-Metallic Materials*, 48(5), 291-300.
- [38] Engin, S., Büyük, U., Kaya, H., Maraşlı, N. 2011. "Directional Solidification and Physical Properties Measurements of the Zinc-Aluminum Eutectic Alloy." *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 18, 659-664.
- [39] Koçak, Y., Engin, S., Büyük, U., Maraşlı, N. 2013. "The Influence of the Growth Rate On the Eutectic Spacings, Undercoolings and Microhardness of Directional Solidified Bismuth-Lead Eutectic Alloy." *Current Applied Physics*, 13 (3), 587-593.
- [40] Çadırlı, E., Kaya, H., Gündüz, M. 2007. "Directional Solidification and Characterization of the Cd-Sn Eutectic Alloy." *Journal of Alloys and Compounds*, 431 (1-2), 171-179.
- [41] Kaya, H., Çadırlı, E., Gündüz, M. 2003. "Effect of Growth Rates and Temperature Gradients On the Spacing and Undercooling in The Broken-Lamellar Eutectic Growth (Sn-Zn Eutectic System)." *Journal of Materials Engineering and Performance*, 12, 456-469.
- [42] Engin, S., Büyük, U. 2018. "Kontrollü Doğrusal Katılaşdırılan Al-Cu Alaşımının Mikroyapısı, Mekanik ve Elektriksel Özelliklerinin Katılaşdırma Hızına Bağlı Değişimi." *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8 (2) 209-221.
- [43] Ourdjini, A., Liu, J., Elliot, R., 1994. "Eutectic Spacing Selection in The Al-Cu System." *Materials Science and Technology*, 10, 312-318.
- [44] Massalski T.B. 1993. *Alloy Phase Diagrams*, Materials Park, OH, ASM International, p 239.
- [45] Jackson, K.A., Hunt J.D. 1966. "Lamellar and Rod Eutectic Growth," *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, 236, 1129- 1142.
- [46] Kaygısız, Y. 2018. "Microstructure Characterization and Hardness of Al-Cu-Mn Eutectic Alloy." *China Foundry* 15, 390-396.
- [47] Kaya, H., Aker, A. 2017. "Effect of Alloying Elements and Growth Rates On Microstructure and Mechanical Properties in The Directionally Solidified Al-Si-X Alloys." *Journal of Alloys and Compounds*, 694, 145-154.
- [48] Steinbach, S., Ratke, L. 2007. "The Influence of Fluid Flow on the Microstructure of Directionally Solidified AlSi-Base Alloys." *Metallurgical and Materials Transactions A*, 38, 1388-1394.
- [49] Büyük, U., Maraşlı N. 2009. "The Microstructure Parameters and Microhardness of Directionally Solidified Sn-Ag-Cu Eutectic Alloy." *Journal of Alloys and Compounds*, 485, 264-269.

Reklam İzlenimi Sırasında Fizyolojik Parametrelerin Analizine Dayalı Tüketici Tercihlerinin Sınıflandırılması

Eda Dağdevir*¹

*¹Kayseri Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Biyomedikal Cihaz Teknolojisi Programı KAYSERİ

(Alınış / Received: 24.05.2024, Kabul / Accepted: 19.08.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.08.2024)

Anahtar Kelimeler

Nöropazarlama,
Fizyolojik Sinyal,
Sinyal İşleme,
Sınıflandırma,
Makine Öğrenimi

Öz: Son yıllarda nöropazarlama, tüketici davranışlarını anlamak için nörobilim yöntemlerini pazarlamaya entegre eden önemli bir strateji olarak ortaya çıkmıştır. Bu alanda, elektroensefalografi gibi beyin sinyali analiz yöntemleri ve vücut sıcaklığı, fotopletizmografi, kardiyak ritim, elektro dermal aktivite, yüz ifadeleri gibi çeşitli fizyolojik ve fiziksel parametreler kullanılarak tüketici tercihleri analiz edilmektedir. Bu çalışmada, "NeuroBioSense" veri seti kullanılarak 18-70 yaş arasındaki 58 katılımcıya, kozmetik ve moda, araba ve teknoloji, gıda ve market kategorilerine ait 35 farklı reklam izletilirken toplanan; kalp hacmi basıncı, elektro dermal aktivite ve vücut sıcaklığı gibi fizyolojik parametreler farklı makine öğrenimi algoritmalarıyla sınıflandırılarak analiz edilmiştir. Sonuçlar, segmentasyon teknikleri kullanılarak çıkarılan kalp hacmi basıncı özniteliklerinin yer aldığı öznitelik setinin ham verilerin yer aldığı öznitelik setine göre daha yüksek sınıflandırma doğruluğu sağladığını göstermektedir. Önerilen yöntem ve DVM sınıflandırıcı ile en iyi sınıflandırma doğruluğu; kozmetik ve moda, araba ve teknoloji, gıda ve market, hepsi kategorileri için sırasıyla %82.2, %86.6, %84.6, %82.9 olarak elde edilmiştir. Bu çalışma, nöropazarlamada fizyolojik sinyallerin analizinin tüketici tercihlerini anlamada etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymakta ve "NeuroBioSense" veri setini kullanacak araştırmacılara karşılaştırma olanağı sunmaktadır.

Classification of Consumer Preferences Based on Analysis of Physiological Parameters During Advertising Viewing

Keywords

Neuromarketing,
Physiological Signal,
Signal Processing,
Classification,
Machine Learning

Abstract: In recent years, neuromarketing has emerged as a significant strategy that integrates neuroscience methods into marketing to understand consumer behaviour. In this field, consumer preferences are analysed using brain signal analysis methods such as electroencephalography and various physiological and physical parameters such as body temperature, photoplethysmography, cardiac rhythm, electrodermal activity, and facial expressions. In this study, physiological parameters such as Blood Volume Pulse, Electrodermal Activity, and Body Temperature, collected while 58 participants aged 18-70 watched 35 advertisements from the categories of cosmetics and fashion, cars and technology, and food and market, were analysed using different machine learning algorithms with the "NeuroBioSense" dataset. The results show that the feature set containing the heart volume pressure features extracted using segmentation techniques provides higher classification accuracy than the feature set containing the raw data. The best classification accuracy with the proposed method and SVM classifier is obtained as 82.2%, 86.6%, 84.6%, 82.9% for the categories of cosmetics and fashion, car and technology, food and market, and all, respectively. This study demonstrates that the analysis of physiological signals in neuromarketing is an effective method for understanding consumer preferences and provides a comparison opportunity for researchers using the "NeuroBioSense" dataset.

*İlgili Yazar, email: edakaracaoglan@gmail.com

1. Giriş

Son yıllarda, pazarlama dünyası geleneksel araçlarına ek olarak nörobilim ve bilgisayar biliminden yararlanarak yeni stratejilere yönelmiştir. Bu stratejilerden biri de "Nöropazarlama" olarak adlandırılan alanın yükselişidir. Nöropazarlama, tüketicilerin gerçek düşüncelerini ve duygularını anlamak için fizyolojik aktivite ölçerek pazarlama stratejilerini optimize etmeyi amaçlar. Bu alanda yapılan çalışmalar, tüketici tercihlerini anlamak için elektroensefalografi (EEG) gibi beyin sinyali analiz yöntemlerinin kullanılmasını öne çıkarmaktadır [1],[2]. EEG'nin yanı sıra vücut sıcaklığı, fotopletizmografi, kardiyak ritim, elektro dermal aktivite, mimik ve yüz ifadesi gibi fizyolojik ve fiziksel parametreler de tüketici tercihlerini belirlemede kullanılmaktadır.

Nöropazarlama, bir bireyin çeşitli ürünler ve medya ile olan deneyimlerine ve pazar reklamlarına verdiği yanıtlara içgörüler sağlamayı amaçlar. Tüketici duygularının karar verme sürecini etkilediği bilinen bir gerçektir. Öte yandan, tüketici duyguları birçok içsel ve dışsal faktörden güçlü bir şekilde etkilenebilir. Dolayısıyla, bir tüketicinin duygusal durumunun tespiti ve tanınması gerçek tüketici tercihlerini ortaya çıkarır [3]. Bu alandaki çalışmalar, tüketici tercihlerini ve davranışlarını anlamamıza yardımcı olurken, bir alışveriş kararı nasıl alındığını anlamamıza da yardımcı olur. Ayrıca, pazarlamaçıların ve kuruluşların müşteri memnuniyetini, olumlu müşteri deneyimlerini, tüketici sadakatini ve geliri artırmak için harekete geçmelerine yardımcı olur [3],[4]. EEG tabanlı duygu tanıma üzerine birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen [4],[5], tüketicilerde tercihleri tespit etmek için fiziksel ve fizyolojik veri ölçüm tabanlı çalışmalar henüz çok erken aşamada [6]. Her ne kadar nöropazarlama alanı son yıllarda önemli ölçüde gelişmiş olsa da bu alan pazarlama araştırma alanlarında henüz tam olarak uygulanmamıştır [5]. Bu durum, pazarlama araştırmacılarının nörobilimde sistematik bilişsel uygulamalar konusunda eğitim eksikliğinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, pazarlama araştırmacıları daha önce, nörobilim teknolojilerinin ticari amaçlar için kullanılması durumunda etik kuralların ihlal edilmesinin ve tüketicilerin gizliliğinin sonuçları konusunda şüpheler taşımaktadır. Gerekli etik kuralların çerçevelerinin belirlenmesi ile bu şüpheler azalsa da pazarlama araştırmacılarının hala nöropazarlama kullanımına karşı hala çekinceleri bulunmaktadır [7]. Dolayısıyla, ürün tercihlerini çıkarmak için pasif gözlemler sırasında EEG verilerinin kullanılması hala açık bir tartışma konusudur [8],[9]. Bu çekince de göz önüne alınarak, EEG ölçümüne alternatif metotlar geliştirilme ihtiyacı duyulmuştur.

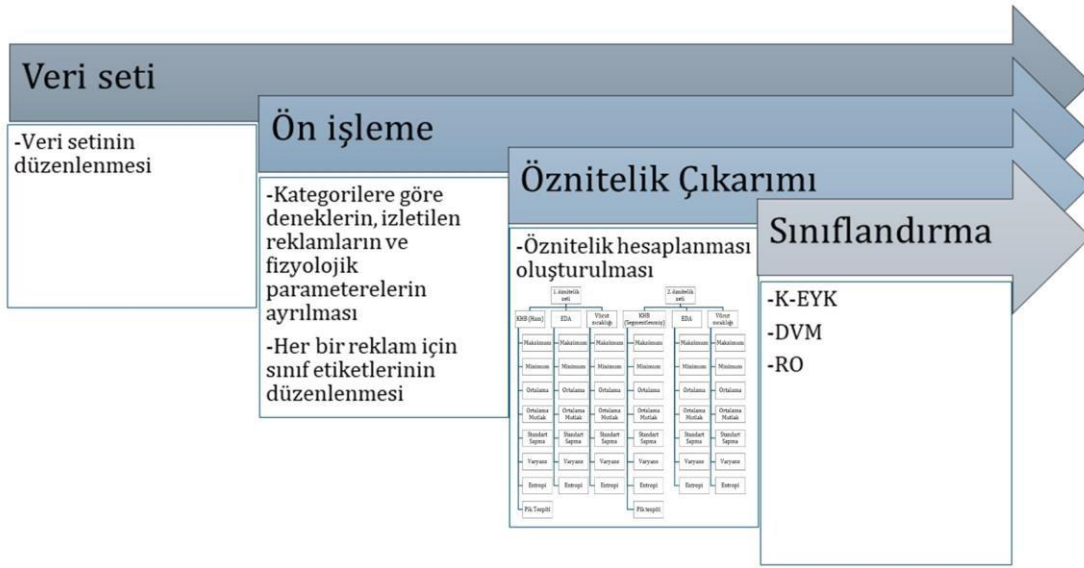
Reklamlar arasındaki farkları karşılaştırmak amacıyla, Murugappan ve arkadaşları [10], EEG sinyalini kullanarak, güç spektral yoğunluğu (GSY), spektral enerji ve spektral merkez ile ilgili öznitelikler ile her katılımcının en sevdiği ürünü belirlemeyi amaçlamıştır. K-EYK gibi makine öğrenimi (MÖ) ve olasılıksal sinir ağı (OSA) algoritmaları gibi derin öğrenme modelleri oluşturarak kullanıcının en çok tercih ettiği ürünü tespit etmede %96.6'ya kadar doğruluk elde etmişlerdir. Benzer bir amaçla, Hakim ve arkadaşları [11] tarafından frontal bant gücü ve hemisferik simetri tabanlı öznitelik çıkarımı ve DVM, Lojistik Regresyon (LR), K-EYK ve Karar Ağaçları (KA) gibi MÖ algoritmalarını kullanarak ikili sınıflandırmada %68.51 maksimum doğruluk elde etmişlerdir. Nöropazarlama çalışmalarındaki bir diğer hedef, reklamın kullanıcılarda yarattığı ilgiyi veya beğeniyi tahmin etmektir. Bu amaçla yapıldığı bilinen ilk çalışma, Soria ve arkadaşları [12] tarafından gerçekleştirilmiştir ve EEG sinyalinin ham verilerinden Yapar Sinir Ağı (YSA) tabanlı bir analizini yaparak, belirli bir reklamın kullanıcı tarafından beğenilip beğenilmediğini tespit etmede %68 doğruluk elde etmişlerdir. Guixeres ve arkadaşları [13] EEG'ye KHB ve Göz izleme (Gİ) parametrelerini de eklemiştir. EEG sinyalinden elde edilen bilgiler, GSY kullanılarak güç tabanlı ve Gİ sinyali için İlgi Alanı (İA) hesaplamışlardır. Bu bilgilerle, kullanıcının beğendiği ürünleri tanımak için YSA tabanlı bir model ile %82.9 doğruluk elde etmişlerdir. Garczarek [14] EEG, EKG, EDA ve Gİ olmak üzere dört farklı fizyolojik sinyali 21 katılımcıdan toplamışlardır ve farklı yöntem kombinasyonlarında en fazla %65.8 doğruluk elde etmişlerdir. Son olarak, Yadava ve arkadaşları [15] EEG sinyalinden ilgili bilgi çıkarmak için Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD) uygulayıp Gizli Markov Modeli (GMM) algoritmasını kullanarak satın alma tercihlerini sınıflandırmışlardır. Bu algoritma seçimiyle, sınıflandırma doğruluğunu %95.33'e çıkarmışlardır. Her ne kadar nörolojik değişimlerin değerlendirilmesinde altın standart olan EEG kadar yüksek başarımlar elde edilemese de EEG yerine tüketici davranışları konusunda bilgi içeren diğer fizyolojik parametrelerden yararlanılabilir.

Bu çalışma Kalp hacmi basıncı (KHB), Elektro dermal aktivite (EDA), Vücut sıcaklığı gibi fizyolojik parametreleri kullanarak nöropazarlamada tercih tespitine yol göstermeyi amaçlamaktadır. Seçilen parametreler, tüketici tercihinin birden fazla fizyolojik parametreyle bağlantılı olduğu gerçeği doğrultusunda tercih edilmiştir [1]. Parametrelerin tüketici tercihindeki etkisini göstermek üzere elde edilen öznitelikler, makine öğrenimi algoritmaları kullanılarak tüketici tercihlerini sınıflandırmak için eğitilmiştir. Kullanılan geleneksel sınıflandırma algoritmaları arasında k-en yakın komşu (K-EYK), destek vektör makinesi (DVM) ve rastgele orman (RO) yer almaktadır.

Çalışmanın geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir: Bölüm 2, bu çalışmanın ana kavramlarını ve araştırma metodolojisini ve materyalleri tanımlar ve sunar; Bölüm 3, değerlendirme sonuçlarını ve tüm bulguları sunar ve son olarak, Bölüm 4, gelecek çalışmaları tartışır, sonucu gösterir.

2. Materyal ve Metot

Sinyal işleme açısından, tüketici tercihlerinin tespiti ve bu tespitin sonuçları, öznitelik çıkarma ve sınıflandırma algoritmalarının seçimlerine bağlıdır. Bu çalışmada, 7 farklı duygusal düzeyi (Sevinç, Şaşkınlık, Öfke, Tikslenme, Üzüntü, Korku, Nötr) ayırt edebilmek için sinyal işleme metotlarının kullanılabilirliği araştırılmıştır. Deneklerden toplanan KHB, EDA, vücut sıcaklığı gibi fizyolojik parametreler kullanılarak farklı özellik çıkarma-sınıflandırma algoritmalarının duygusal düzeyleri ayırt edebilme performansı karşılaştırılmıştır. Fizyolojik parametrelerden öznitelik çıkarma için fizyolojik verilerden istatistiksel öznitelik çıkarma metotları kullanılmıştır. Katılımcı tercihlerini etkili bir şekilde yansıtabildiği için geleneksel sınıflandırıcılar olan K-EYK, DVM ve RO sınıflandırma amacıyla kullanılmıştır. Veri işleme prosedürünün tamamı MATLAB R2023b aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmaya ait akış şeması Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Çalışmanın akış şeması

2.1. Veri seti

Bu çalışmada kullanılan veri seti, dikkatle planlanmış bir deney tasarımı uygulanarak 18 ila 70 yaş arasındaki 58 katılımcıdan elde edilmiştir. Katılımcılara kozmetik ve moda, araba ve teknoloji, gıda ve market olmak üzere üç kategoriye ayrılmış 35 reklam gösterilmiştir. Her bir kategoride yer alan denek ve reklam sayıları ve isimlendirmeleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Veri seti kategorine göre denek ve reklam sayıları

Reklam kategorisi	Denek No.	Reklam No.
Kozmetik ve moda	1-18(18 denek)	A01-A15(15 reklam)
Araba ve teknoloji	19-38(20 denek)	A01-A10(10 reklam)
Gıda ve market	39-58(20 denek)	A01-A10(10 reklam)

“Empatica e4” giyilebilir sensör cihazı ile KHB, EDA, vücut sıcaklığı, üç eksenli ivmelenme gibi fizyolojik sinyalleri kaydedilmiştir. Aynı anda, reklamları izleme süreçlerinde yüz ifadelerinin yakalanma işlemi yüksek çözünürlüklü kameralar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Katılımcıların duygusal değerlendirmeleri duygu değerlendirme ölçeği kullanılarak değerlendirilirken, demografik bilgiler anketler aracılığıyla toplanmıştır. Katılımcıların duygusal yanıtları, Yüz İfadeleri Çözme Sistemi (Facial Action Coding System -FACS) kullanılarak değerlendirilmiştir. 7 farklı duygu (Sevinç, Şaşkınlık, Öfke, Tikslenme, Üzüntü, Korku, Nötr) sınıfı için değerlendirme yapılmıştır. Bu duygu durumlarının belirlenmesi için kullanılan, deneklerin reklam izlemesi sırasındaki video kayıtlarından rastgele elde edilen örnek görseller Şekil 2’de yer almaktadır.



Şekil 2. Reklam izlenimi sırasında deneklerin video kayıtlarından elde edilen örnek görseller

Bu çalışmada veri setindeki bazı özel işlemler ve sinyaller hariç tutularak, tüm katılımcılar için, KHB, EDA, Sıcaklık parametreleri ile oluşturulan öznitelikler, veri seti oluşturucuları tarafından belirlenen duygu yanıtları ile sınıflandırılmıştır. Detaylı bilgi “NeuroBioSense” veri seti açıklamalarında yer almaktadır [16].

2.2. Ön işleme

Tüm katılımcılar için, KHB, EDA, Sıcaklık parametreleri sırasıyla 64,4,4 Hz örnekleme frekansı ile kaydedilmiştir. Öznitelik çıkarımından kullanılacak tüm parametreler, her bir katılımcı için reklam ve sınıf etiketi bilgisini içerecek şekilde düzenlenmiştir. Katılımcıların çoğu bir reklam için birden fazla duygu yanıtı verdiği için, veri seti oluşturucuları da yanıtları ve diğer parametreleri dikkate alarak bazı reklamlar için birden fazla sınıf etiketi oluşturmuşlardır. Bu nedenle toplam sınıf sayısı, katılımcıların izlediği toplam reklam sayısından daha fazladır.

2.3. Öznitelik çıkarımı

Fizyolojik sinyalleri kullanarak farklı uygulamalara yönelik özniteliklerin elde edilmesi için önerilen birçok yaklaşım vardır [17]. Bu çalışmada, KHB, EDA, Sıcaklık parametreleri özelinde etkin özniteliklerin elde edilebileceği aşağıda hesapları yer alan öznitelikler kullanılmıştır [18].

Öznitelik setlerinden birincisi, KHB parametresi, pencere uzunluğu sinyalin uzunluğunun dörtte biri ve dörtte bir örtüşme olacak şekilde pencerelere ayrılarak bir öznitelik seti oluşturulmuştur. Pencere uzunluğu ve örtüşme uzunluğuna karar vermek amacıyla farklı pencere ve örtüşme uzunlukları seçimi için optimizasyon çalışması ile tüm sınıflandırma süreci tekrar edilmiştir [19]. Bu amaçla, belirlenen pencere uzunluğu ve örtüşme uzunluğu parametreleri ve onların seviyeleri Tablo 2’de verilmiştir. Optimum pencereleme sürecine ait detaylar [19]’de yer almaktadır. Deneyler sonucunda DVM sınıflandırıcısı için, en yüksek sınıflandırma doğruluğu ve en düşük zamanlama maliyeti için optimum pencere uzunluğu 3 s, örtüşme miktarı 1 s olacak şekilde seçilmiştir.

Öznitelik setlerinden ikincisi ise, KHB parametresine herhangi bir pencereleme ve örtüşme uygulanmadan oluşturulmuştur. Ayrıca her iki öznitelik setinde, EDA ve vücut sıcaklığı parametrelerine pencereleme ve örtüşme uygulanmadan öznitelikler elde edilmiştir.

Tablo 2. Veri seti kategorine göre denek ve reklam sayıları

Parametreler	Seviyeler		
	1	2	3
Pencere Uzunluğu (s)	3	5	7.5
Örtüşme Uzunluğu (s)	0	1	2

Maksimum değer:

$$Maks = \max (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

Minimum değer:

$$Min = \min (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2)$$

Ortalama değer:

$$Ort = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

Ortalama mutlak değer:

$$Ort Mut = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i| \quad (4)$$

Standart sapma değeri:

$$Std Sapma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - Ort)^2} \quad (5)$$

Varyans değeri:

$$Var = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - Ort)^2 \quad (6)$$

Entropi değeri:

$$Ent = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2(p_i) \quad (7)$$

Eşitlik 1, Eşitlik 2 ve Eşitlik 3'te x_1, x_2, \dots, x_n n örneklemden oluşan sinyalin zaman serisi örnekleridir. Eşitlik 4 ve Eşitlik 5 ve Eşitlik 6'da x_i sinyalin zaman serisi örneklerini temsil eder. Eşitlik 5 ve Eşitlik 6'da Ort örneklemin ortalama değeridir. Eşitlik 7'de p_i sinyaldeki farklı değerlerin olasılıklarını temsil eder ve değer i 'nin sinyalde görülme sayısının toplam sinyaldeki örnek sayısına oranını gösterir.

Pik tespiti: Pik tespiti yöntemleri sinyaldeki yerel maksimum veya minimum noktalarını belirler. Pik tespiti yalnızca KHB parametresi için hesaplanmıştır.

Sonuç olarak, tüm kategorilerin toplamı (Hepsi) için, birinci öznitelik setinin boyutu 1288 x 118 iken ikinci öznitelik setinin boyutu 1288 x 22'dir. Burada, katılımcılara 670 video izletilmiş olsa da katılımcıların çoğu bir reklam için birden fazla duygu yanıtı verdiği için, bazı reklamlar için birden fazla sınıf etiketi mevcuttur. Bu nedenle etiketli video sayısı her iki öznitelik seti için de 1288'dir. KHB parametresine 3s pencere uzunluğunda 1s örtüşme ile segmentleme uygulanması durumunda sinyal 13 epoktan oluşmaktadır. EDA ve sıcaklık için pik tespiti anlamlı bir öznitelik yansıtmayacağından yalnızca KHB parametresi için pik tespiti hesabı da öznitelik olarak kullanılmıştır. Bunun yanı sıra KHB ve diğer parametreler için yukarıda açıklanan 7 öznitelik hesaplanmıştır. Bu durumda, birinci öznitelik seti için toplam öznitelik sayısı 118'dir. İkinci öznitelik setinde ise ham veriler kullanıldığından KHB, EDA ve sıcaklık için sırasıyla öznitelik sayısı 8,7,7 olarak belirlenmiştir ve etiketli video sayısı da yine 1288'dir.

2.4. Sınıflandırma

Bu çalışmada, "NeuroBioSense" veri setinden elde edilen veriler için 7 duygu durumu (Sevinç, Şaşkınlık, Öfke, Tiksinme, Üzüntü, Korku, Nötr) tespit edilmiştir. Temel olarak, geleneksel sınıflandırıcılar karşılaştırılmıştır. En iyi doğruluğu ve en uygun sınıflandırıcıyı bulmak için K-EYK, DVM ve RO sınıflandırıcıları 5 kat çapraz doğrulama ile uygulanmıştır.

K-EYK, temelde bir sınıflandırma ve regresyon algoritmasıdır. Bu algoritmanın temel prensibi, veri noktalarının etiketlerinin, çevrelerindeki k komşusunun etiketlerine bakılarak belirlenmesidir. Sınıflandırma durumunda, bir noktanın sınıfını, ona en yakın olan k komşusunun etiketlerine bakarak belirler. Bu çalışmada k , 5 seçilmiştir.

Regresyon durumunda ise, komşuların ortalama değerlerini kullanarak tahmin yapar [20]. K-EYK algoritması, özellikle çok karmaşık olmayan problemlerde oldukça etkilidir.

DVM, özellikle sınıflandırma problemleri için kullanılan bir makine öğrenmesi algoritmasıdır. DVM, veri noktalarını sınıflar arasında bir hiper düzlemlerle en iyi şekilde ayırarak çalışır. Bu, sınıflar arasındaki marjı maksimize etmeye çalışırken, aynı zamanda sınıflandırma hatasını minimize etmeyi hedefler [21]. DVM, özellikle yüksek boyutlu veri setlerinde ve doğrusal olmayan sınıflandırma problemlerinde güçlü performans gösterir. Bu algoritma, farklı çekirdek fonksiyonları kullanarak veri noktalarını daha yüksek boyutlu bir uzaya yansıtabilir, bu da sınıflandırma doğruluğunu artırır. Bu nedenle çoğu sınıflandırma problemi için başarılı bir modeldir.

RO, hem sınıflandırma hem de regresyon problemleri için kullanılan bir makine öğrenmesi algoritmasıdır. RO, birden çok karar ağacının bir araya gelerek bir tahmin yapmasını sağlar. Her bir ağaç, rastgele örnekleme ve rastgele öznelik seçimi yaparak eğitilir, böylece aşırı uyum riski azalırken, tahmin performansı artar. Bu yöntem, özellikle büyük ve karmaşık veri setlerinde güçlü bir genel performans sunar. Rastgele Orman algoritması, veri setindeki çeşitli değişkenlerin önem derecesini değerlendirebilme yeteneği sayesinde, öznelik seçimi ve sınıflandırma modelinin açıklanabilirliği açısından da değerli bir araçtır [22].

Yöntemin sınıflandırma performansını ölçmek için sınıflandırıcıların doğruluk, duyarlılık, kesinlik ve F1-skoru değerleri hesaplanmıştır. Gerçek Pozitif (GP): Doğru şekilde o sınıfa ait olarak sınıflandırılan öznelikler, Gerçek Negatif (GN): Doğru şekilde o sınıfa ait olmayan olarak sınıflandırılan öznelikler, Yanlış Pozitif (YP): Yanlış şekilde o sınıfa ait olarak sınıflandırılan öznelikler ve Yanlış Negatif (YN): Yanlış şekilde o sınıfa ait olmayan olarak sınıflandırılan öznelikler olmak üzere:

Doğruluk, sınıflandırıcının doğru sınıflandırdığı örneklerin toplam örnek sayısına oranı temsil eder. Eşitlik 8'de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$\text{Doğruluk} = \frac{GP + GN}{GP + GN + YP + YN} \quad (8)$$

Duyarlılık, gerçek pozitiflerin doğru bir şekilde tahmin edilme oranını ölçer. Eşitlik 9'da gösterildiği gibi hesaplanır.

$$\text{Duyarlılık} = \frac{GP}{GP + YN} \quad (9)$$

Kesinlik, sınıflandırıcının pozitif olarak tahminlediği örneklerin ne kadarının gerçekten pozitif olduğunun ölçüsüdür. Eşitlik 10'da gösterildiği gibi hesaplanır.

$$\text{Kesinlik} = \frac{GP}{GP + YP} \quad (10)$$

F1 skoru, kesinlik ve duyarlılığın harmonik ortalamasını ifade eder. Eşitlik 11'de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$F1 - \text{skoru} = 2 \frac{\text{Duyarlılık} \cdot \text{Kesinlik}}{\text{Duyarlılık} + \text{Kesinlik}} \quad (11)$$

Bu çalışmada 7 farklı sınıf olduğundan sınıflandırıcı performansları, tüm sınıflar için toplam GP, GN, YP ve YN değerleri kullanılarak mikro ortalama ile hesap edilmiştir.

3. Bulgular

Çalışmada elde edilen sınıflandırma sonuçları Tablo 3, Tablo 4 ve Tablo 5'te özetlenmiştir. Önerilen sınıflandırma yönteminin etkinliğini değerlendirmek amacıyla, pencerelere ayrılarak KHB verilerinden elde edilen özneliklerin yer aldığı sınıflandırma sonuçları, ham verilerden doğrudan elde edilen özneliklerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 3 pencerelere ayrılarak KHB verilerinden elde edilen öznelikler kullanılarak bulunan sınıflandırma sonuçlarını göstermektedir. Ham verilerden doğrudan elde edilen özneliklerle yapılan sınıflandırma sonuçları ise Tablo 4'te verilmiştir. Tablo 3 ve Tablo 4 analiz edildiğinde, pencerelere ayrılarak KHB verilerinden elde edilen öznelikler kullanılarak yapılan sınıflandırmanın doğruluk performansını artırdığı görülmektedir. Tablolarda sonuçların 4 kategoride değerlendirildiği görülmektedir. "Kozmetik ve moda", "Araba ve teknoloji", "Gıda ve

market”; 3 farklı kategorideki reklamları izleyen ayrı denek gruplarının 7 farklı duygu durumunun (Sevinç, Şaşkınlık, Öfke, Tiksinme, Üzüntü, Korku, Nötr) sınıflandırmasını gösterirken, "Hepsi" kategoriden bağımsız olarak tüm denek gruplarının sınıflandırma sonuçlarını birlikte göstermektedir.

Tablo 3 ve 4'teki sonuçları değerlendirirken, DVM sınıflandırma performanslarının diğer sınıflandırıcılara nazaran “Kozmetik ve moda” kategorisi hariç olmak üzere, daha yüksek olduğu görülmektedir. “Kozmetik ve moda” kategorisi için ise K-EYK ve DVM sınıflandırıcıları aynı performansı gösterirken RO sınıflandırma başarısı daha düşüktür. Ayrıca, "Hepsi" sınıflandırma performansının, “Araba ve teknoloji” sınıflandırma performansından daha düşük olduğu “Kozmetik ve moda” ve “Gıda ve market” sınıflandırma performanslarıyla ise yaklaşık aynı olduğu gözlemlenmiştir. KHB verilerinin pencerelere ayrıldığı öznelikler kullanılarak “Araba ve teknoloji” kategorisindeki reklamların; ham veriler kullanılarak ise “Gıda ve market” kategorisindeki reklamların diğer kategorilere göre daha yüksek doğruluk ile sınıflandırıldığı görülmektedir.

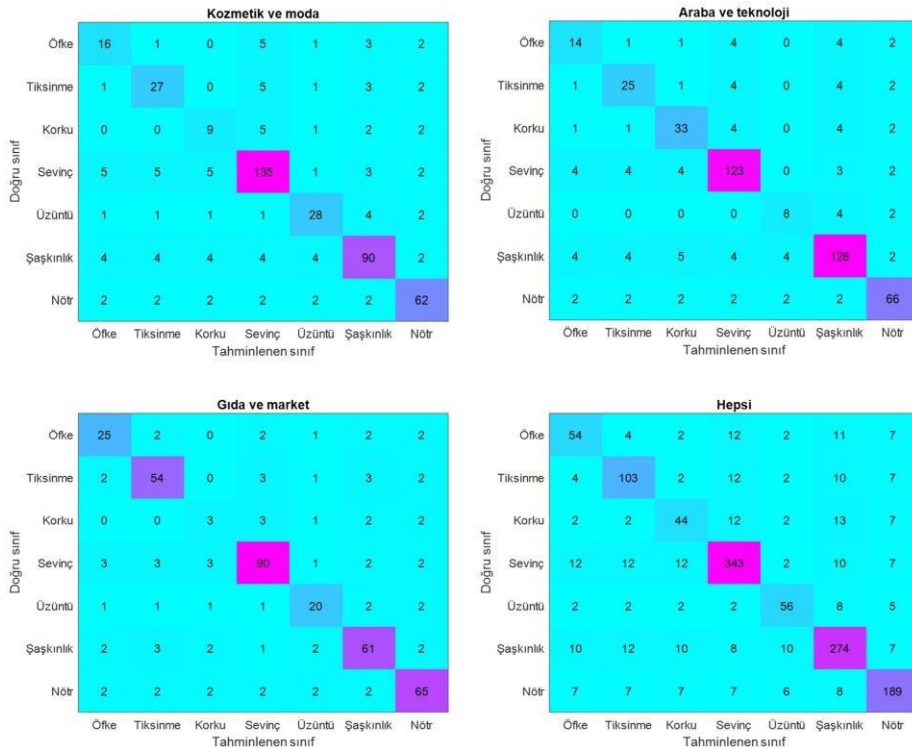
Tablo 3. KHB verilerinin pencerelere ayrıldığı öznelikler için sınıflandırma doğrulukları

	K-EYK	DVM	RO
Kozmetik ve moda	0.817	0.822	0.795
Araba ve teknoloji	0.845	0.866	0.845
Gıda ve market	0.817	0.846	0.827
Hepsi	0.820	0.829	0.802

Tablo 4. Ham verilerle elde edilen öznelikler için sınıflandırma doğrulukları

	K-EYK	DVM	RO
Kozmetik ve moda	0.796	0.803	0.782
Araba ve teknoloji	0.807	0.827	0.808
Gıda ve market	0.824	0.831	0.823
Hepsi	0.795	0.797	0.785

Pencerelere ayrılarak KHB verilerinden öznelikler kullanılarak elde edilen sonuçlara göre sınıflandırıcıların diğer performans metrikleri Tablo 5'te gösterilmiştir. Ayrıca her bir reklam kategorisinde en iyi doğruluk sonuçlarının elde edildiği DVM sınıflandırıcısı için konfüzyon matrisleri Şekil 3'te verilmiştir. Çalışma yer alan tüm sınıflandırıcılar için doğruluk, duyarlılık, kesinlik ve F1-skoru performans metrikleri verilmiştir. Doğrulukta olduğu gibi diğer metriklerde de DVM sınıflandırıcısının başarımı daha yüksektir. Tablolardaki sonuçları değerlendirerek, katılımcıların beğeni durumlarının, çıkarılan öznelikler kullanılarak doğruluk, duyarlılık, kesinlik ve F1-skoru metrikleri açısından başarıyla sınıflandırıldığı sonucuna varılmaktadır.



Şekil 3. Her reklam kategorisi için DVM sınıflandırıcısına ait konfüzyon matrisleri

Tablo 5. Önerilen öznitelikler ile elde edilen sınıflandırma performans metrikleri

Performans Metriği	Doğruluk			Duyarlılık			Kesinlik			F1-skoru		
	K-EYK	DVM	RO	K-EYK	DVM	RO	K-EYK	DVM	RO	K-EYK	DVM	RO
Kozmetik ve moda	0.82	0.82	0.80	0.81	0.81	0.78	0.81	0.81	0.78	0.78	0.81	0.78
Araba ve teknoloji	0.85	0.87	0.85	0.84	0.85	0.84	0.84	0.85	0.84	0.84	0.85	0.84
Gıda ve market	0.82	0.85	0.83	0.82	0.85	0.83	0.82	0.85	0.83	0.82	0.85	0.83
Hepsi	0.82	0.83	0.80	0.82	0.82	0.79	0.82	0.82	0.79	0.82	0.82	0.79

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, nöropazarlama uygulamalarında kullanılmak üzere duygu durumunun tespiti için farklı öznitelik çıkarma ve sınıflandırma yöntemleri önerilmiştir. 58 denek, 18,20,20 denekten oluşan 3 farklı gruba ayrılarak 3 farklı kategoride reklam videolarını izlemeleri sağlanmıştır. Bu sırada deneklerden alınan fizyolojik parametrelerden KHB, EDA, Sıcaklık parametreleri bu sınıflandırma çalışması için öznitelik oluşturmak amacıyla kullanılmıştır.

Ham verilerden doğrudan elde edilen öznitelikler ile önerilen pencereleme ve segmentasyon ile çıkarılan KHB ve diğer öznitelikler K-EYK, DVM, RO gibi geleneksel sınıflandırıcılarla sınıflandırılmıştır. Tablo 3 ve 4'ü karşılaştırdığımızda, önerilen öznitelik çıkarma yaklaşımının sınıflandırma performansını artırdığını gözlemlenmektedir. Her iki yöntemde de en yüksek sınıflandırma doğruluğunu DVM sınıflandırıcısı sağlamıştır. Şekil 3'te DVM sınıflandırıcısıyla her bir kategori için elde edilen konfüzyon matrisleri önerilen yöntemin en iyi sevinç duygusunu ardından ise şaşkınlık ve nötr duyguları ayırt edebildiğini göstermektedir.

Bu çalışmada, tüketicilerin reklamlara karşı duygu durumu tahmini için fizyolojik sinyallerinin analizi amacıyla bir öznitelik çıkarma ve sınıflandırma yöntemi önerilmektedir. Önerilen yöntemin ham sinyallere göre daha yüksek sınıflandırma performansı sağladığını görülmektedir. Bu çalışma, Nöropazarlama alanında "Neurobiosense" veri seti üzerinde fizyolojik parametrelerin analizi ve sınıflandırılmasıyla tüketici tercihlerinin tanınmasına yönelik yaklaşım sunmaktadır. Elde edilen bulgular, pazarlama stratejilerinin geliştirilmesi ve tüketici davranışlarının anlaşılması için değerli bir katkı sağlayabilir. Ancak, gelecekteki çalışmalarda daha geniş veri setlerinin kullanılması ve farklı öznitelik çıkarma tekniklerinin test edilmesi gerekmektedir.

Devam eden çalışmalarda, önerilen yaklaşım farklı öznitelikler dahil edilerek genişletilecektir. Ayrıca, öznitelik çıkarma ve sınıflandırma için yeni yöntemlerin geliştirilmesine çalışılmaktadır. Veri setinin oldukça yeni olması sebebiyle, her ne kadar bu çalışmada elde edilen sonuçlar literatür ile karşılaştırılamasa da bu çalışma ile literatüre ilgili veri seti için karşılaştırma olanağı katkısı sağlanmıştır.

Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan veri seti için "Neurobiosense" veri seti sağlayıcılarına teşekkür ederim. Bu çalışmada yer alan tüm veriler için gerekli etik izinler "Neurobiosense" veri seti sağlayıcıları tarafından alınmıştır.

Kaynakça

- [1] Aldayel, M., Ykhlef, M., Al-Nafjan, A. 2021. Recognition of consumer preference by analysis and classification EEG signals. *Frontiers in Human Neuroscience*. 14, 604639.
- [2] Ceylan, B., TÜZÜN, S., Aydın, A. 2020. Detection of Consumer Preferences Using EEG Signals. *International Journal of Applied Mathematics Electronics and Computers*. 8 (4), 289–294.
- [3] Aldayel, M., Ykhlef, M., Al-Nafjan, A. 2020. Deep learning for EEG-based preference classification in neuromarketing. *Applied Sciences*. 10 (4), 1525.
- [4] Alsharif, A., Salleh, N.Z.M., Pileliené, L., Abbas, A.F., Ali, J. 2022. Current Trends in the Application of EEG in Neuromarketing: A Bibliometric Analysis. *Scientific Annals of Economics and Business*. 69 (3), 393–415.
- [5] Antiopi, P., Kalaitzi, E., Fidas, C.A. 2024. A Review on the Use of EEG for the Investigation of the Factors that Affect Consumer's Behavior. *Physiology & Behavior*. 114509.
- [6] Byrne, A., Bonfiglio, E., Rigby, C., Edlestyn, N. 2022. A systematic review of the prediction of consumer preference using EEG measures and machine-learning in neuromarketing research. *Brain Informatics*. 9 (1), 27.
- [7] Hammou, K.A., Galib, M.H., Melloul, J. 2013. The contributions of neuromarketing in marketing research.

- Journal of management research*. 5 (4), 20.
- [8] Telpaz, A., Webb, R., Levy, D.J. 2015. Using EEG to predict consumers' future choices. *Journal of Marketing Research*. 52 (4), 511-529.
- [9] Morin, C. 2011. Neuromarketing: the new science of consumer behavior. *Society*. 48 (2), 131-135.
- [10] Murugappan, M., Murugappan, S., Gerard, C. 2014. Wireless EEG signals based neuromarketing system using Fast Fourier Transform (FFT). içinde: 2014 IEEE 10th Int. Colloq. signal Process. its Appl., IEEE, ss. 25-30.
- [11] Hakim, A., Klorfeld, S., Sela, T., Friedman, D., Shabat-Simon, M., Levy, D.J. 2021. Machines learn neuromarketing: Improving preference prediction from self-reports using multiple EEG measures and machine learning. *International Journal of Research in Marketing*. 38 (3), 770-791.
- [12] Soria Morillo, L.M., García, J.A.A., Gonzalez-Abril, L., Ramirez, J.A.O. 2015. Advertising liking recognition technique applied to neuromarketing by using low-cost EEG headset. içinde: Bioinforma. Biomed. Eng. Third Int. Conf. IWBBIO 2015, Granada, Spain, April 15-17, 2015. Proceedings, Part II 3, Springer, ss. 701-709.
- [13] Guixeres, J., Bigné, E., Ausin Azofra, J.M., Alcaniz Raya, M., Colomer Granero, A., Fuentes Hurtado, F. 2017. Consumer neuroscience-based metrics predict recall, liking and viewing rates in online advertising. *Frontiers in psychology*. 8 1808.
- [14] Garczarek-Bąk, U. 2018. Explicit and implicit factors that determine private labels' possible purchase: Eyetracking and EEG research. *International Journal of Management and Economics*. 54 (1), 36-49.
- [15] Yadava, M., Kumar, P., Saini, R., Roy, P.P., Prosad Dogra, D. 2017. Analysis of EEG signals and its application to neuromarketing. *Multimedia Tools and Applications*. 76 19087-19111.
- [16] Kocaçınar, B., İnan, P., Zamur, E.N., Çalşımşek, B., Akbulut, F.P., Catal, C. 2024. NeuroBioSense: A Multidimensional Dataset for Neuromarketing Analysis. *Data in Brief*. 110235.
- [17] Murugappan, M., Nagarajan, R., Yaacob, S. 2011. EEG Sinyalleri Kullanarak İnsan Duygularını Sınıflandırmak için Mekansal Filtreleme ve Dalgacık Dönüşümünü Birleştirmek. *Tıbbi ve Biyoloji Mühendisliği Dergisi*. 31 (1), 45-51.
- [18] Singh, A.K. Krishnan, S. 2023. ECG signal feature extraction trends in methods and applications. *BioMedical Engineering OnLine*. 22 (1), 22.
- [19] Dagdevir, E., Tokmakci, M. 2021. Optimization of preprocessing stage in EEG based BCI systems in terms of accuracy and timing cost. *Biomedical Signal Processing and Control*. 67 102548.
- [20] Altman, N.S. (1992) An introduction to kernel and nearest-neighbor nonparametric regression. *The American Statistician*. 46 (3), 175-185.
- [21] Vapnik, V. 1995. Support-vector networks. *Machine learning*. 20 273-297.
- [22] Breiman, L. 2001. Random forests. *Machine learning*. 45 5-32.

Mathematical Modeling of Skin Cancer with the Effect of Stress

Şemsettin Tunca^{*2}, M. Tamer Şenel¹, Fatma Özköse¹

^{*1}Erciyes University, Department of Mathematics, Faculty of Science, KAYSERİ

²Institute of Science, Erciyes University, KAYSERİ

(Alınış / Received: 13.12.2023, Kabul / Accepted: 22.07.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.08.2024)

Keywords

Fractional-Order Differential
Equations,
Skin Cancer,
Numerical Solutions,
Existence and Uniqueness

Abstract: This paper introduces a mathematical model for skin cancer, formulated by fractional order differential equations (FODE). Considering the importance of the stress factor, it is included in the model and its effect on tumor cells is scrutinized. The study examines the local stability of equilibrium points and evaluates the impact of fractional derivatives on the dynamic behavior of the system. In addition, numerical simulations are conducted to analyze the influence of fractional order derivatives and distinct parameters on population dynamics. The presentation of graphs based on various fractional orders and parameter values aids in the visualization of the findings. The study further investigates the impact of stress on tumor cells. The outcomes are expected to provide valuable insights to medical researchers in developing appropriate measures for screening and treating skin cancer.

Cilt Kanserinin Stres Etkisiyle Matematiksel Modellenmesi

Anahtar Kelimeler

Kesirli Mertebeden
Diferansiyel Denklemler,
Cilt Kanseri,
Nümerik Simülasyonlar,
Varlık ve Teklik

Öz: Bu çalışmada cilt kanseri için kesirli mertebeli diferansiyel denklemler (FODE) ile formüle edilen matematiksel bir model sunulmuştur. Stres faktörünün önemi dikkate alınarak modele dahil edilmiş ve tümör hücreleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Denge noktalarının yerel kararlılığı incelenmiştir ve kesirli türevlerin sistemin dinamik davranışı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Ek olarak, kesirli mertebeli türevlerin ve farklı parametrelerin popülasyon dinamikleri üzerindeki etkisini analiz etmek için sayısal simülasyonlar yapılmıştır. Çeşitli kesirli mertebeli ve parametre değerlerine dayalı grafiklerin sunulması, bulguların görselleştirilmesine yardımcı olmaktadır. Ayrıca stresin tümör hücreleri üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Sonuçların, tıbbi araştırmacılara cilt kanserinin taranması ve tedavisi için uygun önlemlerin geliştirilmesinde değerli bilgiler sağlaması beklenmektedir.

*İlgili Yazar: semsettintunca@gmail.com

1. Introduction

Basal cell and squamous cell carcinomas are two examples of non-melanoma skin malignancies. Despite the rarity of death, surgical treatment is both uncomfortable and disfiguring. It is hard to identify the temporal trends in the occurrence of these malignancies since the proper recording of them has not been accomplished. But particular studies from Australia, Canada, and the US show that the prevalence of non-melanoma skin cancers grew by a factor of more than two between the 1960s and the 1980s. Despite being far less common than non-melanoma skin cancers, malignant melanoma is the most common kind of skin cancer fatality and is more frequently reported and appropriately diagnosed than non-melanoma skin cancers. Malignant melanoma incidence has considerably grown in the US since the early 1970s, rising by an average of 4% yearly. A person's UV exposure habits, genetic make-up, and attitude all have an impact on their risk of getting malignant melanoma, according to several research. The incidence of skin malignancies, including melanoma and nonmelanoma, has gone up recently. Every year, there are 2 to 3 million occurrences of non-melanoma skin cancer and 132.000 cases of melanoma skin cancer globally. Data released by the Skin Cancer Foundation

indicates that one in three cancer diagnoses are related to skin cancer, and one in five Americans will have skin cancer at some time in their life. The atmosphere's ability to prevent dangerous solar UV radiation from penetrating the Earth's surface declines as ozone levels drop. It is anticipated that there would be 4.500 more incidences of melanoma skin cancer and 300.000 more cases of non-melanoma skin cancer for every 10% drop in ozone levels ([https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/radiation-ultraviolet-\(uv\)radiation-and-skin-cancer](https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/radiation-ultraviolet-(uv)radiation-and-skin-cancer)).

Skin cancer arises from the skin cells, which are the fundamental building blocks of the skin tissue. Normally, these cells undergo a process of growth and division to produce new cells, while old and damaged cells are naturally eliminated. However, in certain cases, this intricate balance is disrupted, resulting in an uncontrolled proliferation of cells that form a tumor mass [1, 2]. Melanoma, the deadliest type of skin cancer, originates from melanocytes and undergoes a distinct clinical course marked by two stages. Melanomas can specifically advance to the malignant vertical growth phase (VGP) following an initial phase of radial development in the epidermis [3]. The cells called melanocytes, which produce the pigment melanin that gives skin its color, give birth to melanoma, a highly aggressive tumor. Melanoma continues to be one of the most aggressive types of cancer even after much study [4]. Melanoma is a very aggressive form of skin cancer with a high death rate and an incidence that is rising quickly. Melanoma is a desirable target for the development of therapeutic vaccinations since it is a solid tumor. T-cell resistance to tumor-associated antigens (TAAs), however, may limit the spectrum of functional tumor-reactive T-cells and so reduce the efficacy of such vaccinations. This may make it more difficult for vaccinations to produce robust antitumor immunity [5]. Tumors can effectively evade the host's natural defences through a multi-step process known as cancer immune editing. Changing from immunosurveillance to immunotolerance of the tumor is the key stage in immunoeediting, which greatly lowers the immune system's capacity to combat cancer. As a result of this process, CD4+ T cells adopt a Type-2" T helper 2 (Th2) phenotype rather than a Type-1" T helper 1 (Th1) phenotype, which favours humoral responses and inhibits cytotoxic effector activities [6, 7, 8]. Tumor cells exploit host defence mechanisms to promote their progression, invasion, and metastasis. One of these mechanisms involves the production of TGF- β cytokine, which exerts an immunosuppressive effect by interfering with antigen presentation to lymph nodes and suppressing the effector functions of CD4+ and CD8+ T cells, such as proliferation, differentiation, and acquisition of effector molecules [9,10]. Although there is a wide range of medications under investigation for use in tumor immunotherapy clinical trials, their primary therapeutic objectives involve the disruption or reversal of tumor-induced immunosuppression [11, 12]. The potential of oncolytic viral therapies as a cancer treatment has been widely recognized, primarily because certain viruses (known as oncolytic viruses) can reproduce within tumor cells without causing harm to normal tissue cells [13]. Models represent a complex network of biological components, incorporating a structure derived from existing knowledge and parameters based on available data [14]. Although many life scientists continue to rely on simple cause-and-effect relationships to expand their understanding, leading researchers have observed that the direct connection between observation and insight is becoming less clear [15]. Effective computer models can be important resources for cancer researchers; systems biologists provide biochemical models of cancer, while physical oncologists provide tissue models. By using systems biology, researchers may learn how the network structure and dynamic behavior of melanoma cells influence the biochemical pathways involved in drug resistance, invasiveness, proliferation, and survival [16].

Researchers have studied various skin cancer system interactions. For example, partial differential equations (PDEs) were used by Eikenberry et al. [17] to create a spatially explicit model that captured the dynamics of melanoma invasion in the skin. In [18], presented a mathematical simulation of the immune response brought on by the simultaneous administration of activated OT1 cytotoxic T cells (CTLs) and anti-CD137 monoclonal antibodies. The treatment targets melanoma in B16 OVA mouse models treated with a particular immunotherapy approach. Nikolov and Menov [19] studied how vaccinations, particularly those based on antigens and dendritic cells, affect the control of melanoma micrometastasis. A mathematical model of tumor cell interactions with M1 and M2 macrophages was presented by Shu et al. [20]. In [21], Özköse et al. presented a mathematical model of stem cells and chemotherapy for cancer treatment using fractional order differential equations. Lai and Friedman [22], developed a mathematical model to address the question of how BRAF/MEK inhibitors and PD-1 inhibitors interact in the treatment of melanoma. Özköse et al. [23], a novel fractional-order mathematical model was investigated that incorporates the Caputo fractional derivative and accounts for the population dynamics of tumor cells, macrophage cells, active macrophage cells, and host cells.

The purpose of this work is to construct a fractional-order mathematical model and analyze the effects of stress on cancer cell proliferation, which is motivated by the preceding explanation. We have presented a model motivated by Öztürk and Özköse's [24] work. A fractional differential equations model research that examines the relationship between the immune system and the tumor was offered by [24]. In this model, we added the stress effect in the model and analyzed it. Considering the importance of the stress factor, its effect on tumor cells has been scrutinized. Consistent systems with coherent units of measurement on both sides of the equations are

crucial tools in fractional systems. Modifying the variables on the right side of the equations, such as elevating them to the power of α , is necessary to achieve dimensional consistency. This approach helps ensure dimensional compatibility, providing a clearer demonstration of how the fractional order influences the developed system. And from this point of view, we take into consideration this in terms of mathematical perspective [25].

2. Preliminaries

Definition 1. [26] The fractional integral of order $\alpha > 0$, of the function $f(t)$, $t > 0$ is given by

$$I^\alpha f(t) = \int_0^t \frac{(t-s)^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} f(s) ds,$$

and the fractional derivative of order $\alpha \in (n-1, n)$, $t > 0$ is given by

$$D^\alpha f(t) = I^{n-\alpha} D^n f(t) \left(D = \frac{d}{dt} \right),$$

where $\alpha > 0$ and $\Gamma(\cdot)$ is the Gamma function.

Definition 2. [26] The Caputo fractional derivative of order $\alpha > 0$ of a function $f: (0, \infty) \rightarrow \mathcal{R}$ is given by

$${}^C_0 D_t^\alpha f(t) = \begin{cases} \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \int_0^t \frac{\left(\frac{d}{d\tau}\right)^n f(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-n+1}} d\tau, & 0 \leq n-1 < \alpha < n, n = [\alpha], n \in N, \\ \left(\frac{d}{dt}\right)^n f(t), & \alpha = n, n \in N. \end{cases} \tag{1}$$

Definition 3. [26] The Laplace transform (LT) of the function $f(t)$ of order $\alpha > 0$ is defined by

$$L[{}^C_0 D_t^\alpha f(t)] = s^\alpha F(s) - \sum_{v=0}^{n-1} f^{(v)}(0) s^{\alpha-v-1}. \tag{2}$$

Definition 4. [26] The Laplace transform (LT) of the function $f(t) = t^{\vartheta_1-1} E_{\vartheta, \vartheta_1}(\pm \omega t^\vartheta)$ is defined as

$$L[t^{\vartheta_1-1} E_{\vartheta, \vartheta_1}(\pm \omega t^\vartheta)] = \frac{s^{\vartheta-\vartheta_1}}{s^\vartheta \pm \omega}. \tag{3}$$

Theorem 1. [27, 28, 29] Consider the following fractional-order system:

$$\frac{d^\alpha x}{dt^\alpha} = f(x), \quad x(0) = x_0, \tag{4}$$

with $\alpha \in (0,1]$ and $x \in R^n$. The zeros of the function $f(X^*) = 0$ are the equilibrium points of the system (5) and these equilibrium points:

(1) Asymptotically stable \Leftrightarrow the eigenvalues λ_i of the Jacobian matrix $J(X^*)$ satisfy that $|\arg(\lambda_i)| > \frac{\alpha\pi}{2}$, $\forall i, i = 1, 2, \dots, n$.

(2) Unstable $\Leftrightarrow \exists i$, such that the corresponding eigenvalue λ_i of $J(X^*)$ satisfy

$$|\arg(\lambda_i)| < \frac{\alpha\pi}{2}, i = 1, 2, \dots, n.$$

Theorem 2. [30] Take into account the polynomial equation

$$P(\lambda) = \lambda^n + a_1\lambda^{n-1} + \dots + a_{n-1}\lambda + a_n.$$

(1) For $n = 1$, the condition for $|\arg(\lambda_i)| > \frac{\alpha\pi}{2}$ is $\alpha_1 > 0$,

(2) For $n = 2$, the condition for $|\arg(\lambda_i)| > \frac{\alpha\pi}{2}$ are either Routh-Hurwitz conditions [31] ($a_1 > 0, a_2 > 0$) or $a_1 < 0, 4a_2 > a_1^2, |\tan^{-1}(4a_2 > a_1^2)| > \frac{\alpha\pi}{2}$.

3. Mathematical Modelling

The use of mathematical models in predicting the severity and progression of skin cancers, as well as forecasting their future manifestations, has proven notably effective. Such models also hold promise in developing treatments for a wide array of ailments. Several mathematical representations have been devised to elucidate the nature of skin cancer and its detrimental influence on various chronic conditions. This study's objective is to explore the association between stress and skin cancer using a distinct model. The evaluation of skin cancer incorporates the consideration of three cell types: macrophage cells (M_1), active macrophage cells (M_2), and tumor cells (T).

Consistent systems with coherent units of measurement on both sides of the equations are crucial tools in fractional systems. Modifying the variables on the right side of the equations, such as elevating them to the power of α , is necessary to achieve dimensional consistency. This approach helps ensure dimensional compatibility, providing a clearer demonstration of how the fractional order influences the developed system. The proposed fractional-order model can be represented as follows:

$$\begin{aligned} {}_0^c D_t^\alpha M_1(t) &= M_1(t)\varphi_1^\alpha \left(1 - \frac{M_1(t)}{\theta_1^\alpha}\right) - \delta^\alpha M_1(t)M_2(t) - \gamma_1^\alpha M_1(t) + \eta_1^\alpha M_2(t) - s_1^\alpha M_1(t), \\ {}_0^c D_t^\alpha M_2(t) &= M_2(t)(\delta^\alpha M_1(t) - \gamma_2^\alpha) - s_2^\alpha M_2(t), \\ {}_0^c D_t^\alpha T(t) &= T(t)\varphi_2^\alpha \left(1 - \frac{T(t)}{\theta_2^\alpha}\right) - \sigma^\alpha T(t)M_2(t) + c^\alpha, \end{aligned} \tag{5}$$

with the initial conditions: $M_1(0) = M_{1_0} \geq 0, M_2(0) = M_{2_0} \geq 0, T(0) = T_0 \geq 0$, where $t \geq 0$ and $\alpha (0 < \alpha \leq 1)$ is order of model.

4. Existence and Uniqueness (E&U)

With the initial conditions $M_1(0) = M_{1_0}, M_2(0) = M_{2_0}, T(0) = T_0$, let's consider the system (5). It is possible to express system (5) as follows:

$${}_0^c D_t^\alpha X(t) = \begin{cases} B_1 X(t) + M_1(t)B_2 X(t) + M_2(t)B_3 X(t) + T(t)B_4 X(t) + V \\ X(t_0) = X_0 \end{cases} \tag{6}$$

Table 1. The biological meanings of the parameters and numerical values

Par.	Description	Values	Reference
θ_1	The macrophages' carrying capacity	20	[24]
θ_2	The tumor cells' carrying capacity	10	[24]
φ_1	Macrophage cells' growth rate	0.5	[24]
φ_2	Tumor cells' growth rate	0.4	[24]
γ_1	The natural death rate of the macrophage cells	0.07	[24]
γ_2	The active-macrophages cells' natural mortality rate	0.7	[24]
σ	The proportion of tumor cells being destroyed	0.3	[24]
δ	The proportion of inactive macrophages that become	0.201	[24]
c	The transformation rate of normal cells to malignant ones	9.8	[24]
η_1	The rate at which activated macrophages transform into	0.05	[24]
s_1	Stress-related macrophage cell degeneration	0.02	Estimated
s_2	Stress-related active-macrophage cell degeneration	0.02	Estimated

Where

$$X(t) = \begin{pmatrix} M_1(t) \\ M_2(t) \\ T(t) \end{pmatrix}, \quad X(0) = \begin{pmatrix} M_1(0) \\ M_2(0) \\ T(0) \end{pmatrix}, \quad B_1 = \begin{pmatrix} \varphi_1^\alpha - \gamma_1^\alpha - s_1^\alpha & \eta_1^\alpha & 0 \\ 0 & -\gamma_1^\alpha - s_2^\alpha & 0 \\ 0 & 0 & \varphi_2^\alpha \end{pmatrix},$$

$$B_2 = \begin{pmatrix} \frac{-\varphi_1^\alpha}{\theta_1^\alpha} & -\delta^\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad B_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \delta^\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad B_4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sigma^\alpha & \frac{-\varphi_2^\alpha}{\theta_2^\alpha} \end{pmatrix}, \quad V = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ c^\alpha \end{pmatrix}.$$

In view of [32, 33, 34, 35], the definitions required for E&U are given following:

Definition 5. Assume that $C^*[0, \tau]$ represents the class of continuous column vector $X(t)$. The continuous functions on the interval $[0, \tau]$ are represented by the components $M_1, M_2, T \in C^*[0, \tau]$. The norm of $X \in C^*[0, \tau]$ is

$$\|X\| = \sup_t |e^{-Nt} M_1(t)| + \sup_t |e^{-Nt} M_2(t)| + \sup_t |e^{-Nt} T(t)|$$

when $t > \psi \geq m$, we write $C_\psi^*[0, \tau]$ and $C_\psi[0, \tau]$.

Definition 6. $X \in C^*[0, \tau]$ is a solution of the initial value problem (IVP) (6) if

(1) $(t, X(t)) \in D, t \in [0, \tau]$ where $D = [0, \tau] \times K, K = \{(M_1, M_2, T) \in R_+^3: |M_1| \leq p, |M| \leq r, |T| \leq w\}$; p, r, w are positive constants.

(2) $X(t)$ satisfy (6).

Theorem 3. The initial value problem (6) has a unique solution $X \in C^*[0, \tau]$.

Proof. The FODE in (6) can be represented based on the characteristics of fractional calculus:

$$I^{1-\alpha} \frac{d}{dt} X(t) = B_1 X(t) + M_1(t) B_2 X(t) + M_2(t) B_3 X(t) + T(t) B_4 X(t) + V.$$

Operating with I^α we get

$$X(t) = X(0) + I^\alpha (B_1 X(t) + M_1(t) B_2 X(t) + M_2(t) B_3 X(t) + T(t) B_4 X(t) + V). \quad (7)$$

Now let $F: C^*[0, \tau] \rightarrow C^*[0, \tau]$ be defined by

$$FX(t) = X(0) + I^\alpha (B_1 X(t) + M_1(t) B_2 X(t) + M_2(t) B_3 X(t) + T(t) B_4 X(t) + V). \quad (8)$$

Then

$$\begin{aligned} e^{-Nt}(FX - FY) &= e^{-Nt} I^\alpha (B_1(X(t) - Y(t)) + M_1(t) B_2(X(t) - Y(t)) \\ &\quad + M_2(t) B_3(X(t) - Y(t)) + T(t) B_4(X(t) - Y(t))) \\ &\leq \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t (t-s)^{\alpha-1} e^{-N(t-s)} (X(s) - Y(s)) \\ &\quad \times e^{-Ns} (B_1 + pB_2 + rB_3 + wB_4) ds \\ &\leq \frac{(B_1 + pB_2 + rB_3 + wB_4)}{N^\alpha} \|X - Y\| \int_0^t \frac{s^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} ds \end{aligned}$$

This implies that

$$\|FX - FY\| \leq \frac{(B_1 + pB_2 + rB_3 + wB_4)}{N^\alpha} \|X - Y\|$$

If N is chosen such that:

$$N^\alpha > B_1 + pB_2 + rB_3 + wB_4,$$

then we obtain

$$\|FX - FY\| \leq \|X - Y\|$$

And the operator F has a fixed point. As a result, (7) has a unique solution $X \in C^*[0, \tau]$. From (7), it has been concluded that:

$$X(t) = X(0) + \frac{t^\alpha}{\Gamma(\alpha + 1)} (B_1X(0) + M_1(0)B_2X(0) + M_2(0)B_3X(0) + T(0)B_4X(0) + V) + I^{\alpha-1} (B_1X'(t) + M_1'(t)B_2X(t) + M_1(t)B_2X'(t) + M_2'(t)B_3X(t) + M_2(t)B_3X'(t) + T'(t)B_4X(t) + T(t)B_4X'(t))$$

and

$$\begin{aligned} \frac{dX(t)}{dt} &= \frac{t^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} (B_1X(0) + M_1(0)B_2X(0) + M_2(0)B_3X(0) + T(0)B_4X(0) + V) + I^\alpha (B_1X'(t) + M_1'(t)B_2X(t) + M_1(t)B_2X'(t) + M_2'(t)B_3X(t) + M_2(t)B_3X'(t) + T'(t)B_4X(t) + T(t)B_4X'(t)) \\ e^{-Nt}X'(t) &= e^{-Nt} \left[\frac{t^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} (B_1X(0) + M_1(0)B_2X(0) + M_2(0)B_3X(0) + T(0)B_4X(0) + V) + I^\alpha (B_1X'(t) + M_1'(t)B_2X(t) + M_1(t)B_2X'(t) + M_2'(t)B_3X(t) + M_2(t)B_3X'(t) + T'(t)B_4X(t) + T(t)B_4X'(t)) \right] \end{aligned}$$

from here, the conclusion $X' \in C_\sigma^*[0, \tau]$ is reached. Then, from (7), we have

$$\begin{aligned} \frac{dX(t)}{dt} &= \frac{d}{dt} I^\alpha (B_1X(t) + M_1(t)B_2X(t) + M_2(t)B_3X(t) + T(t)B_4X(t) + V), \\ I^{1-\alpha} \frac{dX(t)}{dt} &= I^{1-\alpha} \frac{d}{dt} I^\alpha (B_1X(t) + M_1(t)B_2X(t) + M_2(t)B_3X(t) + T(t)B_4X(t) + V), \end{aligned}$$

$$D^\alpha X(t) = B_1X(t) + M_1(t)B_2X(t) + M_2(t)B_3X(t) + T(t)B_4X(t) + V$$

and

$$X(0) = X_0 + I^\alpha (B_1X(t) + M_1(t)B_2X(t) + M_2(t)B_3X(t) + T(t)B_4X(t) + V),$$

therefore (7) is equivalent to the initial value problem (6).

5. Equilibrium Points and Their Stability (E&S)

To calculate the equilibria of system (5), let

$$\begin{aligned} {}_0^c D_t^\alpha M_1(t) &= 0, \\ {}_0^c D_t^\alpha M_2(t) &= 0, \\ {}_0^c D_t^\alpha T(t) &= 0. \end{aligned}$$

Thus

$$\begin{aligned} M_1 \varphi_1^\alpha \left(1 - \frac{M_1}{\theta_1^\alpha} \right) - \delta^\alpha M_1 M_2 - \gamma_1^\alpha M_1 + \eta_1^\alpha M_2 - s_1^\alpha M_1 &= 0, \\ M_2 (\delta^\alpha M_1 - \gamma_2^\alpha) - s_2^\alpha M_2 &= 0, \\ T \varphi_2^\alpha \left(1 - \frac{T}{\theta_2^\alpha} \right) - \sigma^\alpha T M_2 + c^\alpha &= 0. \end{aligned} \tag{9}$$

Then the equilibrium points are:

$$E_1 = \left(0, 0, \frac{\theta_2^\alpha}{2} - \frac{1}{2} \theta_2^{\frac{\alpha}{2}} \varphi_2^{-\frac{\alpha}{2}} (4c^\alpha + \theta_2^\alpha \varphi_2^\alpha)^{\frac{1}{2}} \right)$$

$$E_2 = \left(0, 0, \frac{\theta_2^\alpha}{2} + \frac{1}{2} \theta_2^{\frac{\alpha}{2}} \varphi_2^{-\frac{\alpha}{2}} (4c^\alpha + \theta_2^\alpha \varphi_2^\alpha)^{\frac{1}{2}} \right)$$

$$E_3 = \left(\theta_1^\alpha \varphi_1^\alpha (-s_1^\alpha - \gamma_1^\alpha + \varphi_1^\alpha), 0, \frac{\theta_2^\alpha}{2} - \frac{1}{2} \theta_2^{\frac{\alpha}{2}} \varphi_2^{-\frac{\alpha}{2}} (4c^\alpha + \theta_2^\alpha \varphi_2^\alpha)^{\frac{1}{2}} \right)$$

$$E_4 = \left(\theta_1^\alpha \varphi_1^\alpha (-s_1^\alpha - \gamma_1^\alpha + \varphi_1^\alpha), 0, \frac{\theta_2^\alpha}{2} + \frac{1}{2} \theta_2^{\frac{\alpha}{2}} \varphi_2^{-\frac{\alpha}{2}} (4c^\alpha + \theta_2^\alpha \varphi_2^\alpha)^{\frac{1}{2}} \right)$$

$$E_5 = \left(\delta^{-\alpha} (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha), \frac{\delta^{-2\alpha} (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) \theta_1^{-\alpha} (-(s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) \varphi_1^\alpha - \delta^\alpha \theta_1^\alpha (s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha))}{s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha} \right. \\ \left. \frac{\delta^{-2\alpha} \theta_1^{-\alpha} \varphi_2^{-\alpha}}{2(s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha)} (\sigma^\alpha (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha)^2 \theta_2^\alpha \varphi_1^\alpha + \delta^\alpha \sigma^\alpha (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) \theta_1^\alpha \theta_2^\alpha (s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha) \right. \\ \left. + \delta^{2\alpha} (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha) \theta_1^\alpha \theta_2^\alpha \varphi_2^\alpha - \delta^{2\alpha} (\theta_2^\alpha (4c^\alpha (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha)^2 \theta_1^{2\alpha} \varphi_2^\alpha + \delta^{-4\alpha} \theta_2^\alpha (\delta^{2\alpha} \eta_1^\alpha \theta_1^\alpha \varphi_2^\alpha \right. \\ \left. - (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) (\sigma^\alpha ((s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) \varphi_1^\alpha + \delta^\alpha \theta_1^\alpha (s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha)) + \delta^{2\alpha} \theta_1^\alpha \varphi_2^\alpha))^2) \right)^{\frac{1}{2}} \Bigg)$$

$$E_6 = \left(\delta^{-\alpha} (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha), \frac{\delta^{-2\alpha} (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) \theta_1^{-\alpha} (-(s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) \varphi_1^\alpha - \delta^\alpha \theta_1^\alpha (s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha))}{s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha} \right. \\ \left. \frac{\delta^{-2\alpha} \theta_1^{-\alpha} \varphi_2^{-\alpha}}{2(s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha)} (\sigma^\alpha (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha)^2 \theta_2^\alpha \varphi_1^\alpha + \delta^\alpha \sigma^\alpha (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) \theta_1^\alpha \theta_2^\alpha (s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha) \right. \\ \left. + \delta^{2\alpha} (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha) \theta_1^\alpha \theta_2^\alpha \varphi_2^\alpha + \delta^{2\alpha} (\theta_2^\alpha (4c^\alpha (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha)^2 \theta_1^{2\alpha} \varphi_2^\alpha + \delta^{-4\alpha} \theta_2^\alpha (\delta^{2\alpha} \eta_1^\alpha \theta_1^\alpha \varphi_2^\alpha \right. \\ \left. - (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) (\sigma^\alpha ((s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) \varphi_1^\alpha + \delta^\alpha \theta_1^\alpha (s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha)) + \delta^{2\alpha} \theta_1^\alpha \varphi_2^\alpha))^2) \right)^{\frac{1}{2}} \Bigg)$$

5.1. Positivity and boundedness

The positivity and boundedness of the model (5) solution have been analyzed in this section. Let $R_+^3 = \zeta(t) \in R^3: \zeta(t) \geq 0$ and $\zeta(t) = [M_1(t), M_2(t), T(t)]^T$. Let us review the lemma that will be utilized to prove that the solution to model (5) is non-negative.

Lemma 1. (Generalized Mean Value Theorem) [26] Assume that $w(t) \in C[a, b]$ and ${}^C_0 D_t^\alpha w(t) \in C[a, b]$ for $0 < \alpha \leq 1$, then $w(t) = w(a) + \frac{1}{\Gamma(\alpha)} {}^C_0 D_t^\alpha w(\tau) (t - a)^\alpha$, where $0 \leq \tau \leq t, \forall t \in (a, b)$.

Remark 1. If $w \in C[a, b]$ and ${}^C_0 D_t^\alpha w(t) \geq 0, \forall t \in (a, b)$, then the function $w(t)$ is non-increasing for all $t \in (a, b)$.

Theorem 4. The solution of model (5) along with initial conditions is bounded in R_+^3 .

Proof.

$$\begin{aligned} {}_0^c D_t^\alpha M_1(t)|_{M_1(t)=0} &= \eta_1^\alpha M_2(t) \geq 0, \\ {}_0^c D_t^\alpha M_2(t)|_{M_2(t)=0} &= 0 \geq 0, \\ {}_0^c D_t^\alpha T(t)|_{T(t)=0} &= c^\alpha \geq 0. \end{aligned} \quad (10)$$

If $(M_1(t), M_2(t), T(t)) \in R_+^3$, then from system (10) and Remark 1, the solution of model (5) can only be of high hyperplanes $M_1(t) = 0, M_2(t) = 0$ and $T(t) = 0$. This concludes that the area R_+^3 is a positive invariant set.

Theorem 5. The region $Q = \{M_1(t), M_2(t), T(t) \in R_+^3, 0 < M_1(t), M_2(t), T(t) \leq c^\alpha p_1 + N(0)p_2\}$ is a positive invariant set for the system (5).

Proof. (5) yields the following:

$$\begin{aligned} {}_0^c D_t^\alpha N(t) = & M_1(t)\varphi_1^\alpha - \frac{\varphi_1^\alpha}{\theta_1^\alpha} M_1^2(t) - \gamma_1^\alpha M_1(t) + \eta_1^\alpha M_2(t) - s_1^\alpha M_1(t) \\ & - \gamma_2^\alpha M_2(t) - s_2^\alpha M_2(t) + T(t)\varphi_2^\alpha - \frac{\varphi_2^\alpha}{\theta_2^\alpha} T^2(t) - \sigma^\alpha T(t)M_2(t) + c^\alpha \end{aligned}$$

This gives ${}_0^c D_t^\alpha N(t) \leq c^\alpha + M_1(t)\varphi_1^\alpha + \eta_1^\alpha M_2(t) + T(t)\varphi_2^\alpha \leq c^\alpha + N(t)$.

When LT is applied to the previous equation, the outcome is:

$$s^v w(N) - s^{v-1} N(0) \leq c^\alpha + w(N)$$

which further gives $w(N) \leq \frac{c^\alpha}{s^{v-1}-1} + \frac{s^{v-1}}{s^v-1} N(0)$, from the definitions 3 and 4, we get that if $(M_1(t), M_2(t), T(t)) \in R_+^3$, then

$$N(t) \leq c^\alpha t^v E_{v,v+1}(t^v) + t^{v-1} E_{v,1}(t^v) N(0) \leq c^\alpha p_1 + N(0)p_2$$

where p_1 and p_2 are constants.

Thus $N(t)$ (the total cell) is bounded and $M_1(t), M_2(t), T(t)$ are bounded.

5.2. Stability of the equilibria

Here, we outline the prerequisites for equilibria's stability.

Theorem 6. Let E_1 be the equilibrium points system (5). Then E_1 is unstable.

Proof. The Jacobian matrix of model (5) evaluated at equilibrium point E_1 is given by

$$J(E_1) = \begin{pmatrix} \varphi_1^\alpha - s_1^\alpha - \gamma_1^\alpha & \eta_1^\alpha & 0 \\ 0 & -\gamma_2^\alpha - s_2^\alpha & 0 \\ 0 & -\sigma^\alpha \left(\frac{\theta_2^\alpha}{2} - \frac{1}{2} \theta_2^{\frac{\alpha}{2}} \varphi_2^{\frac{\alpha}{2}} (4c^\alpha + \theta_2^\alpha \varphi_2^\alpha)^{\frac{1}{2}} \right) & \theta_2^{-\frac{\alpha}{2}} \varphi_2^{\frac{\alpha}{2}} (4c^\alpha + \theta_2^\alpha \varphi_2^\alpha)^{\frac{1}{2}} \end{pmatrix}$$

The characteristic equation is $|J(E_1) - \lambda I| = 0$. Hence the eigenvalues of $J(E_1)$ are written as

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= -s_2^\alpha - \gamma_2^\alpha, \\ \lambda_2 &= \theta_2^{-\frac{\alpha}{2}} \varphi_2^{\frac{\alpha}{2}} (4c^\alpha + \theta_2^\alpha \varphi_2^\alpha)^{\frac{1}{2}}, \\ \lambda_3 &= -s_1^\alpha - \gamma_1^\alpha + \varphi_1^\alpha. \end{aligned}$$

We know that $\varphi_1, \varphi_2, \theta_1, \theta_2, \delta, \gamma_1, \gamma_2, \eta_1, \sigma, c$ are positive. Since $\lambda_1 < 0$ and $|\arg(\lambda_1)| > \frac{\alpha\pi}{2}$, $\lambda_2 > 0$ and $|\arg(\lambda_2)| < \frac{\alpha\pi}{2}$. According to the Theorem (1), equilibrium point E_1 is unstable.

Theorem 7. Let E_2 be the equilibrium points system (5). Assume that $\varphi_1^\alpha < s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha$. Then E_2 is locally asymptotically stable (LAS).

Proof. The Jacobian matrix of model (5) obtained at E_2 equilibrium point is given by

$$J(E_2) = \begin{pmatrix} \varphi_1^\alpha - \gamma_1^\alpha - s_1^\alpha & \eta_1^\alpha & 0 \\ 0 & -\gamma_2^\alpha - s_2^\alpha & 0 \\ 0 & -\sigma^\alpha \left(\frac{\theta_2^\alpha}{2} + \frac{1}{2} \theta_2^{\frac{\alpha}{2}} \varphi_2^{-\frac{\alpha}{2}} (4c^\alpha + \theta_2^\alpha \varphi_2^\alpha)^{\frac{1}{2}} \right) & -\theta_2^{-\frac{\alpha}{2}} \varphi_2^{\frac{\alpha}{2}} (4c^\alpha + \theta_2^\alpha \varphi_2^\alpha)^{\frac{1}{2}} \end{pmatrix}$$

The characteristic equation is $|J(E_2) - \lambda I| = 0$. Hence the eigenvalues of $J(E_2)$ are written as

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= -s_2^\alpha - \gamma_2^\alpha, \\ \lambda_2 &= -\theta_2^{-\frac{\alpha}{2}} \varphi_2^{\frac{\alpha}{2}} (4c^\alpha + \theta_2^\alpha \varphi_2^\alpha)^{\frac{1}{2}}, \\ \lambda_3 &= -s_1^\alpha - \gamma_1^\alpha + \varphi_1^\alpha. \end{aligned}$$

We know that $\varphi_1, \varphi_2, \theta_1, \theta_2, \delta, \gamma_1, \gamma_2, \eta_1, \sigma, c$ are positive. Since $\lambda_1 < 0$ and $|\arg(\lambda_1)| > \frac{\alpha\pi}{2}$, $\lambda_2 < 0$ and $|\arg(\lambda_2)| > \frac{\alpha\pi}{2}$, We assume that $\varphi_1^\alpha < s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha$ then $\lambda_3 < 0$ and $|\arg(\lambda_3)| > \frac{\alpha\pi}{2}$. Therefore, all eigenvalues satisfy $|\arg(\lambda_i)| > \frac{\alpha\pi}{2}$. Hence by Theorem (1), E_2 is locally asymptotic stable.

Theorem 8. Let E_3 be the equilibrium points system (5). Then E_3 is unstable.

Proof. The Jacobian matrix of model (5) evaluated at equilibrium point E_3 is given by

$$J(E_3) = \begin{pmatrix} s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha & \eta_1^\alpha + \theta_1^\alpha \varphi_1^{-\alpha} \delta^\alpha (s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha) & 0 \\ 0 & -s_2^\alpha - \gamma_2^\alpha - \theta_1^\alpha \varphi_1^{-\alpha} \delta^\alpha (s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha) & 0 \\ 0 & -\sigma^\alpha \left(\frac{\theta_2^\alpha}{2} - \frac{1}{2} \theta_2^{\frac{\alpha}{2}} \varphi_2^{-\frac{\alpha}{2}} (4c^\alpha + \theta_2^\alpha \varphi_2^\alpha)^{\frac{1}{2}} \right) & \theta_2^{-\frac{\alpha}{2}} \varphi_2^{\frac{\alpha}{2}} (4c^\alpha + \theta_2^\alpha \varphi_2^\alpha)^{\frac{1}{2}} \end{pmatrix}$$

The characteristic equation is $|J(E_3) - \lambda I| = 0$. Hence the eigenvalues of $J(E_3)$ are written as

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \theta_2^{-\frac{\alpha}{2}} \varphi_2^{\frac{\alpha}{2}} (4c^\alpha + \theta_2^\alpha \varphi_2^\alpha)^{\frac{1}{2}}, \\ \lambda_2 &= s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha, \\ \lambda_3 &= -s_2^\alpha - \gamma_2^\alpha - \theta_1^\alpha \varphi_1^{-\alpha} \delta^\alpha (s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha). \end{aligned}$$

We know that $\varphi_1, \varphi_2, \theta_1, \theta_2, \delta, \gamma_1, \gamma_2, \eta_1, \sigma, c$ are positive. $\lambda_1 > 0$ and $|\arg(\lambda_1)| < \frac{\alpha\pi}{2}$. According to the Theorem (1), equilibrium point E_3 is unstable.

Theorem 9. Let E_4 be the equilibrium points system (5). Assume that $s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha < \varphi_1^\alpha$ and $-\theta_1^\alpha \varphi_1^{-\alpha} \delta^\alpha (s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha) < s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha$. Then E_4 is LAS.

Proof. The Jacobian matrix of model (5) evaluated at equilibrium point E_4 is given by

$$J(E_4) = \begin{pmatrix} s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha & \eta_1^\alpha + \theta_1^\alpha \varphi_1^{-\alpha} \delta^\alpha (s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha) & 0 \\ 0 & -s_2^\alpha - \gamma_2^\alpha - \theta_1^\alpha \varphi_1^{-\alpha} \delta^\alpha (s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha) & 0 \\ 0 & -\sigma^\alpha \left(\frac{\theta_2^\alpha}{2} + \frac{1}{2} \theta_2^{\frac{\alpha}{2}} \varphi_2^{-\frac{\alpha}{2}} (4c^\alpha + \theta_2^\alpha \varphi_2^\alpha)^{\frac{1}{2}} \right) & -\theta_2^{-\frac{\alpha}{2}} \varphi_2^{\frac{\alpha}{2}} (4c^\alpha + \theta_2^\alpha \varphi_2^\alpha)^{\frac{1}{2}} \end{pmatrix}$$

The characteristic equation is $|J(E_4) - \lambda I| = 0$. Hence the eigenvalues of $J(E_4)$ are written as

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= -\theta_2^{-\frac{\alpha}{2}} \varphi_2^{\frac{\alpha}{2}} (4c^\alpha + \theta_2^\alpha \varphi_2^\alpha)^{\frac{1}{2}}, \\ \lambda_2 &= s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha. \\ \lambda_3 &= -s_2^\alpha - \gamma_2^\alpha - \theta_1^\alpha \varphi_1^{-\alpha} \delta^\alpha (s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha). \end{aligned}$$

We know that $\varphi_1, \varphi_2, \theta_1, \theta_2, \delta, \gamma_1, \gamma_2, \eta_1, \sigma, c$ are positive. Since $\lambda_1 < 0$ and $|\arg(\lambda_1)| > \frac{\alpha\pi}{2}$. We assume that $s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha < \varphi_1^\alpha$ and $-\theta_1^\alpha \varphi_1^{-\alpha} \delta^\alpha (s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha) < s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha$ then $\lambda_2 < 0$ and $|\arg(\lambda_2)| > \frac{\alpha\pi}{2}$, $\lambda_3 < 0$ and $|\arg(\lambda_3)| > \frac{\alpha\pi}{2}$. Therefore, all eigenvalues satisfy $|\arg(\lambda_i)| > \frac{\alpha\pi}{2}$. Hence by Theorem (1), E_4 is locally asymptotic stable.

Theorem 10. Let E_5 be the equilibrium points system (5). Assume that

$$\begin{aligned} s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha &< \eta_1^\alpha, s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha < -\delta^\alpha \theta_1^\alpha \varphi_1^{-\alpha} (s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha) \text{ and} \\ (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha)^2 \varphi_1^\alpha &< \eta_1^\alpha (2(s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) \varphi_1^\alpha + \delta^\alpha \theta_1^\alpha (s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha)) \end{aligned}$$

Then the E_5 is locally asymptotically stable.

Proof.

$$J(E_5) = \begin{pmatrix} j_{11} & \eta_1^\alpha - (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) & 0 \\ j_{21} & 0 & 0 \\ 0 & j_{32} & j_{33} \end{pmatrix}$$

Where

$$\begin{aligned} j_{11} &= -s_1^\alpha - \gamma_1^\alpha + \varphi_1^\alpha - 2\delta^{-\alpha} (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) \theta_1^{-\alpha} \varphi_1^\alpha + \left(\frac{\delta^{-\alpha} \theta_1^{-\alpha} (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) (\delta^\alpha s_1^\alpha \theta_1^\alpha + \delta^\alpha \gamma_1^\alpha \theta_1^\alpha + \varphi_1^\alpha (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \delta^\alpha \theta_1^\alpha))}{s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha} \right), \\ j_{21} &= \frac{\delta^{-\alpha} \theta_1^{-\alpha} (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) (-\varphi_1^\alpha (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) - \delta^\alpha \theta_1^\alpha (s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha))}{s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha}, \end{aligned}$$

$$j_{32} = \frac{-\sigma^\alpha \delta^{-2\alpha} \theta_1^{-\alpha} \varphi_2^{-\alpha}}{2(s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha)} (\sigma^\alpha (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha)^2 \theta_2^\alpha \varphi_1^\alpha + \delta^\alpha \sigma^\alpha (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) \theta_1^\alpha \theta_2^\alpha (s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha) + \delta^{2\alpha} (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha) \theta_1^\alpha \theta_2^\alpha \varphi_2^\alpha - \delta^{2\alpha} (\theta_2^\alpha (4c^\alpha (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha)^2 \theta_1^{2\alpha} \varphi_2^\alpha + \delta^{-4\alpha} \theta_2^\alpha (\delta^{2\alpha} \eta_1^\alpha \theta_1^\alpha \varphi_2^\alpha - (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) (\sigma^\alpha ((s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) \varphi_1^\alpha + \delta^\alpha \theta_1^\alpha (s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha)) + \delta^{2\alpha} \theta_1^\alpha \varphi_2^\alpha))^2)) \Big)^{\frac{1}{2}},$$

$$j_{33} = \theta_1^{-\alpha} \theta_2^{-\alpha} (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha)^{-1} (\theta_2^\alpha (4c^\alpha (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha)^2 \theta_1^{2\alpha} \varphi_2^\alpha + \delta^{-4\alpha} \theta_2^\alpha (\delta^{2\alpha} \eta_1^\alpha \theta_1^\alpha \varphi_2^\alpha - (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) (\sigma^\alpha ((s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) \varphi_1^\alpha + \delta^\alpha \theta_1^\alpha (s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha)) + \delta^{2\alpha} \theta_1^\alpha \varphi_2^\alpha))^2)) \Big)^{\frac{1}{2}}.$$

The characteristic equation is $|J(E_5) - \lambda I| = 0$. Hence

$$(\lambda + Z)(\lambda^2 + G\lambda + R) = 0 \tag{11}$$

where

$$G = \delta^{-\alpha} \theta_1^{-\alpha} \left((s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha)^2 \varphi_1^\alpha - \eta_1^\alpha (2(s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) \varphi_1^\alpha + \delta^\alpha \theta_1^\alpha (s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha)) \right) (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha)^{-1},$$

$$R = \delta^{-\alpha} (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) \theta_1^{-\alpha} (- (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) \varphi_1^\alpha - \delta^\alpha \theta_1^\alpha (s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha)),$$

$$Z = -\theta_1^{-\alpha} \theta_2^{-\alpha} (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha)^{-1} (\theta_2^\alpha (4c^\alpha (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha)^2 \theta_1^{2\alpha} \varphi_2^\alpha + \delta^{-4\alpha} \theta_2^\alpha (\delta^{2\alpha} \eta_1^\alpha \theta_1^\alpha \varphi_2^\alpha - (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) (\sigma^\alpha ((s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) \varphi_1^\alpha + \delta^\alpha \theta_1^\alpha (s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha)) + \delta^{2\alpha} \theta_1^\alpha \varphi_2^\alpha))^2)) \Big)^{\frac{1}{2}}.$$

Let λ_1, λ_2 and λ_3 be the roots of (11). Given the presumptions, we may say that $\varphi_1, \varphi_2, \theta_1, \theta_2, \delta, \gamma_1, \gamma_2, \eta_1, \sigma, c$ are positive. Therefore $\lambda_1 = -Z < 0, G > 0, R > 0$. Thus, from Routh-Hurwitz Criteria if $G > 0, R > 0$ then λ_2 and λ_3 are negative or have negative real parts. Due to this, all eigenvalues ensure $|\arg(\lambda_i)| > \frac{\alpha\pi}{2}$ and E_5 is local asymptotically stable.

Eigenvalues of $J(E_5)$ are:

$$\lambda_1 = \theta_1^{-\alpha} \theta_2^{-\alpha} (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha)^{-1} (\theta_2^\alpha (4c^\alpha (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha)^2 \theta_1^{2\alpha} \varphi_2^\alpha + \delta^{-4\alpha} \theta_2^\alpha (\delta^{2\alpha} \eta_1^\alpha \theta_1^\alpha \varphi_2^\alpha - (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) (\sigma^\alpha ((s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) \varphi_1^\alpha + \delta^\alpha \theta_1^\alpha (s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha)) + \delta^{2\alpha} \theta_1^\alpha \varphi_2^\alpha))^2)) \Big)^{\frac{1}{2}},$$

$$\lambda_2 = -\frac{1}{2(s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha)} (\delta^{-\alpha} (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - 2\eta_1^\alpha) \theta_1^{-\alpha} \varphi_1^\alpha - \eta_1^\alpha (s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha) + (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha) (\delta^{-2\alpha} \theta_1^{-2\alpha} (4\delta^\alpha (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) \theta_1^\alpha ((s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) \varphi_1^\alpha + \delta^\alpha \theta_1^\alpha (s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha)) + \delta^{2\alpha} \theta_1^\alpha \varphi_2^\alpha)) + ((s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha)^2 \varphi_1^\alpha - \eta_1^\alpha (2(s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) \varphi_1^\alpha + \delta^\alpha \theta_1^\alpha (s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha)))^2 (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha)^{-2})) \Big)^{\frac{1}{2}},$$

$$\lambda_3 = \frac{1}{2(s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha)} \left(-\delta^{-\alpha}(s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha)(s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - 2\eta_1^\alpha)\theta_1^{-\alpha}\varphi_1^\alpha + \eta_1^\alpha(s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha) \right. \\ \left. + (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha)(\delta^{-2\alpha}\theta_1^{-2\alpha}(4\delta^\alpha(s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha)\theta_1^\alpha((s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha)\varphi_1^\alpha + \delta^\alpha\theta_1^\alpha(s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha)) \right. \\ \left. + ((s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha)^2\varphi_1^\alpha - \eta_1^\alpha(2(s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha)\varphi_1^\alpha + \delta^\alpha\theta_1^\alpha(s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha)))^2 (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha)^{-2} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Theorem 11. Let E_6 be the equilibrium points system (5). Assume that

$$s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha > \eta_1^\alpha, s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha < -\delta^\alpha\theta_1^\alpha\varphi_1^{-\alpha}(s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha) \text{ and} \\ (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha)^2\varphi_1^\alpha > \eta_1^\alpha(2(s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha)\varphi_1^\alpha + \delta^\alpha\theta_1^\alpha(s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha))$$

Then the E_6 is locally asymptotically stable.

Proof.

$$J(E_6) = \begin{pmatrix} j_{11} & \eta_1^\alpha - (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) & 0 \\ j_{21} & 0 & 0 \\ 0 & j_{32} & j_{33} \end{pmatrix}$$

where

$$j_{11} = -s_1^\alpha - \gamma_1^\alpha + (1 - 2\delta^{-\alpha}(s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha)\theta_1^{-\alpha})\varphi_1^\alpha - \left(\frac{\delta^{-\alpha}(s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha)\theta_1^{-\alpha}(-(s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha)\varphi_1^\alpha - \delta^\alpha\theta_1^\alpha(s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha))}{s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha} \right), \\ j_{21} = \frac{\delta^{-\alpha}(s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha)\theta_1^{-\alpha}(-(s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha)\varphi_1^\alpha - \delta^\alpha\theta_1^\alpha(s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha))}{s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha},$$

$$j_{32} = \frac{-\sigma^\alpha\delta^{-2\alpha}\theta_1^{-\alpha}\varphi_2^{-\alpha}}{2(s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha)} \left(\sigma^\alpha(s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha)^2\theta_2^\alpha\varphi_1^\alpha + \delta^\alpha\sigma^\alpha(s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha)\theta_1^\alpha\theta_2^\alpha(s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha) \right. \\ \left. + \delta^{2\alpha}(s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha)\theta_1^\alpha\theta_2^\alpha\varphi_2^\alpha + \delta^{2\alpha}(\theta_2^\alpha(4c^\alpha(s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha)^2\theta_1^{2\alpha}\varphi_2^\alpha + \delta^{-4\alpha}\theta_2^\alpha(\delta^{2\alpha}\eta_1^\alpha\theta_1^\alpha\varphi_2^\alpha \right. \\ \left. - (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha)(\sigma^\alpha((s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha)\varphi_1^\alpha + \delta^\alpha\theta_1^\alpha(s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha)) + \delta^{2\alpha}\theta_1^\alpha\varphi_2^\alpha))^2) \right)^{\frac{1}{2}},$$

$$j_{33} = -\theta_1^{-\alpha}\theta_2^{-\alpha}(s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha)^{-1}(\theta_2^\alpha(4c^\alpha(s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha)^2\theta_1^{2\alpha}\varphi_2^\alpha + \delta^{-4\alpha}\theta_2^\alpha(\delta^{2\alpha}\eta_1^\alpha\theta_1^\alpha\varphi_2^\alpha \right. \\ \left. - (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha)(\sigma^\alpha((s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha)\varphi_1^\alpha + \delta^\alpha\theta_1^\alpha(s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha)) + \delta^{2\alpha}\theta_1^\alpha\varphi_2^\alpha))^2) \right)^{\frac{1}{2}}.$$

The characteristic equation is $|J(E_6) - \lambda I| = 0$. Hence

$$(\lambda + K)(\lambda^2 + G\lambda + R) = 0 \tag{12}$$

where

$$G = \delta^{-\alpha}\theta_1^{-\alpha} \left((s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha)^2\varphi_1^\alpha - \eta_1^\alpha(2(s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha)\varphi_1^\alpha + \delta^\alpha\theta_1^\alpha(s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha)) \right) (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha)^{-1},$$

$$R = \delta^{-\alpha}(s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha)\theta_1^{-\alpha} \left(-(s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha)\varphi_1^\alpha - \delta^\alpha\theta_1^\alpha(s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha) \right),$$

$$K = \theta_1^{-\alpha} \theta_2^{-\alpha} (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha)^{-1} (\theta_2^\alpha (4c^\alpha (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha)^2 \theta_1^{2\alpha} \varphi_2^\alpha + \delta^{-4\alpha} \theta_2^\alpha (\delta^{2\alpha} \eta_1^\alpha \theta_1^\alpha \varphi_2^\alpha - (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) (\sigma^\alpha ((s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) \varphi_1^\alpha + \delta^\alpha \theta_1^\alpha (s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha)) + \delta^{2\alpha} \theta_1^\alpha \varphi_2^\alpha)))^{\frac{1}{2}}.$$

Let λ_1, λ_2 and λ_3 be the roots of (12). By the assumptions, we know that $\varphi_1, \varphi_2, \theta_1, \theta_2, \delta, \gamma_1, \gamma_2, \eta_1, \sigma, c$ are positive. Therefore $\lambda_1 = -K < 0, G > 0, R > 0$. From Routh-Hurwitz Criteria if $G > 0, R > 0$ then λ_2 and λ_3 are negative or have negative real parts. Due to this, all eigenvalues ensure $|\arg(\lambda_i)| > \frac{\alpha\pi}{2}$ by Theorem (1) and E_6 is local asymptotically stable.

Eigenvalues of $J(E_6)$ are:

$$\lambda_1 = -\theta_1^{-\alpha} \theta_2^{-\alpha} (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha)^{-1} (\theta_2^\alpha (4c^\alpha (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha)^2 \theta_1^{2\alpha} \varphi_2^\alpha + \delta^{-4\alpha} \theta_2^\alpha (\delta^{2\alpha} \eta_1^\alpha \theta_1^\alpha \varphi_2^\alpha - (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) (\sigma^\alpha ((s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) \varphi_1^\alpha + \delta^\alpha \theta_1^\alpha (s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha)) + \delta^{2\alpha} \theta_1^\alpha \varphi_2^\alpha)))^{\frac{1}{2}},$$

$$\lambda_2 = -\frac{1}{2(s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha)} (\delta^{-\alpha} (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - 2\eta_1^\alpha) \theta_1^{-\alpha} \varphi_1^\alpha - \eta_1^\alpha (s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha) + (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha) (\delta^{-2\alpha} \theta_1^{-2\alpha} (4\delta^\alpha (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) \theta_1^\alpha ((s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) \varphi_1^\alpha + \delta^\alpha \theta_1^\alpha (s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha)) + ((s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha)^2 \varphi_1^\alpha - \eta_1^\alpha (2(s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) \varphi_1^\alpha + \delta^\alpha \theta_1^\alpha (s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha)))^2 (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha)^{-2}))^{\frac{1}{2}}),$$

$$\lambda_3 = \frac{1}{2(s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha)} (-\delta^{-\alpha} (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - 2\eta_1^\alpha) \theta_1^{-\alpha} \varphi_1^\alpha + \eta_1^\alpha (s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha) + (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha) (\delta^{-2\alpha} \theta_1^{-2\alpha} (4\delta^\alpha (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) \theta_1^\alpha ((s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) \varphi_1^\alpha + \delta^\alpha \theta_1^\alpha (s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha)) + ((s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha)^2 \varphi_1^\alpha - \eta_1^\alpha (2(s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha) \varphi_1^\alpha + \delta^\alpha \theta_1^\alpha (s_1^\alpha + \gamma_1^\alpha - \varphi_1^\alpha)))^2 (s_2^\alpha + \gamma_2^\alpha - \eta_1^\alpha)^{-2}))^{\frac{1}{2}}).$$

6. Numerical Scheme for the Provided Skin Cancer Model in the Caputo Fractional (CF) Derivative Sense

Using the CF operator, the dynamics of the proposed fractional-order model (5) are investigated. Using the Adams-type estimator-corrector approach, we carry out numerical simulations for the suggested nonlinear fractional-order system [36, 37, 38, 39]. We examine the subsequent Cauchy-type ordinary differential equation within the context of the α -order Caputo operator:

$${}_0^C D_t^\alpha \Phi(t) = f(t, \Phi(t)), \Phi^{(b)}(0) = \Phi_0^b, 0 < a \leq 1, 0 < t \leq \tau \tag{13}$$

where $b = 0, 1, \dots, n - 1$, and $n = [\alpha]$ Equation (13) can be turned to the Volterra equation:

$$\Phi(t) = \sum_{b=0}^{n-1} \Phi_0^{(b)} \frac{t^b}{b!} + \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t (t-s)^{\alpha-1} \Phi(s, \Phi(s)) ds \tag{14}$$

Considering the Adam-Bashforth-Moulton algorithm [37] along with the proposed predictor-corrector scheme to provide numerical solutions for the model, we adopt $h = \frac{\tau}{N}, t_z = zh$, and $z = 0, 1, \dots, N \in Z^+$, allowing $\Phi_z \approx \Phi(t_z)$ for discretization. The associated corrector formula is derived as per the reference [40].

$$\begin{aligned}
 M_{1_{q+1}} &= \sum_{z=0}^{q-1} M_{1_0}^{(z)} \frac{t_{q+1}^z}{z!} + \frac{h^\alpha}{\Gamma(\alpha + 2)} \sum_{z=0}^q (p_{z,q+1}) \left(M_{1_z} \varphi_1^\alpha \left(1 - \frac{M_{1_z}}{\theta_1} \right) \right. \\
 &\quad \left. - \delta^\alpha M_{1_z} M_{2_z} - \gamma_1^\alpha M_{1_z} + \eta_1^\alpha M_{2_z} - s_1^\alpha M_{1_z} \right) \\
 &\quad + \frac{h^\alpha}{\Gamma(\alpha + 2)} \sum_{z=0}^q (p_{q+1,q+1}) \left(M_{1_{q+1}}^{PF} \varphi_1^\alpha \left(1 - \frac{M_{1_{q+1}}^{PF}}{\theta_1} \right) \right. \\
 &\quad \left. - \delta^\alpha M_{1_{q+1}}^{PF} M_{2_{q+1}}^{PF} - \gamma_1^\alpha M_{1_{q+1}}^{PF} + \eta_1^\alpha M_{2_{q+1}}^{PF} - s_1^\alpha M_{1_{q+1}}^{PF} \right), \\
 M_{2_{q+1}} &= \sum_{z=0}^{q-1} M_{2_0}^{(z)} \frac{t_{q+1}^z}{z!} + \frac{h^\alpha}{\Gamma(\alpha + 2)} \sum_{z=0}^q (p_{z,q+1}) (M_{2_z} (\delta^\alpha M_{1_z} - \gamma_2^\alpha) - s_2^\alpha M_{2_z}) \\
 &\quad + \frac{h^\alpha}{\Gamma(\alpha + 2)} \sum_{z=0}^q (p_{q+1,q+1}) \left(M_{2_{q+1}}^{PF} (\delta^\alpha M_{1_{q+1}}^{PF} - \gamma_2^\alpha) - s_2^\alpha M_{2_{q+1}}^{PF} \right), \\
 T_{q+1} &= \sum_{z=0}^{q-1} T_0^{(z)} \frac{t_{q+1}^z}{z!} + \frac{h^\alpha}{\Gamma(\alpha + 2)} \sum_{z=0}^q (p_{z,q+1}) \left(T_z \varphi_2^\alpha \left(1 - \frac{T_z}{\theta_2^\alpha} \right) - \sigma^\alpha T_z M_{2_z} + c^\alpha \right) \\
 &\quad + \frac{h^\alpha}{\Gamma(\alpha + 2)} \sum_{z=0}^q (p_{q+1,q+1}) \left(T_{q+1}^{PF} \varphi_2^\alpha \left(1 - \frac{T_{q+1}^{PF}}{\theta_2^\alpha} \right) - \sigma^\alpha T_{q+1}^{PF} M_{2_{q+1}}^{PF} + c^\alpha \right),
 \end{aligned}$$

Where

$$p_{z,q+1} = \begin{cases} q^{\alpha+1} - (q - \alpha)(q + 1)^\alpha, & \text{if } z = 0, \\ (q - z + 2)^{\alpha+1} + (q - z)^{\alpha+1} - 2(q - z + 1)^{\alpha+1}, & \text{if } 1 \leq z \leq q, \\ 1, & \text{if } z = q + z. \end{cases} \tag{15}$$

The next step is to build the coincident predictor formula. Φ_{q+1}^{PF} . The following formula can be used to compute the predictor:

$$\begin{aligned}
 M_{1_{q+1}}^{PF} &= \sum_{z=0}^{q-1} M_{1_0}^{(z)} \frac{t_{q+1}^z}{z!} + \frac{h^\alpha}{\Gamma(\alpha + 1)} \sum_{z=0}^q (j_{z,q+1}) \left(M_{1_z} \varphi_1^\alpha \left(1 - \frac{M_{1_z}}{\theta_1} \right) \right. \\
 &\quad \left. - \delta^\alpha M_{1_z} M_{2_z} - \gamma_1^\alpha M_{1_z} + \eta_1^\alpha M_{2_z} - s_1^\alpha M_{1_z} \right), \\
 M_{2_{q+1}}^{PF} &= \sum_{z=0}^{q-1} M_{2_0}^{(z)} \frac{t_{q+1}^z}{z!} + \frac{h^\alpha}{\Gamma(\alpha + 1)} \sum_{z=0}^q (j_{z,q+1}) (M_{2_z} (\delta^\alpha M_{1_z} - \gamma_2^\alpha) - s_2^\alpha M_{2_z}), \\
 T_{q+1}^{PF} &= \sum_{z=0}^{q-1} T_0^{(z)} \frac{t_{q+1}^z}{z!} + \frac{h^\alpha}{\Gamma(\alpha + 1)} \sum_{z=0}^q (j_{z,q+1}) \left(T_z \varphi_2^\alpha \left(1 - \frac{T_z}{\theta_2^\alpha} \right) - \sigma^\alpha T_z M_{2_z} + c^\alpha \right).
 \end{aligned} \tag{16}$$

where

$$j_{z,q+1} = (q + 1 - z)^\alpha - (q - z)^\alpha.$$

7. Numerical Simulations and Discussion

We have used the Adams-Bashforth Moulton Predictor-Corrector technique to generate numerical solutions for system (5) with initial conditions $(M_{1_0}, M_{2_0}, T_0) = (33, 22, 50)$ and parameters given in Table (1). The goal of the numerical simulations is to investigate the effects of changing α values and parameter values on the dynamic behavior of model (5). Table (1) provides specific information on the parameter values used in the numerical simulations. We have performed numerical simulations using the parameter values from Table (1) to investigate the temporal dynamics of each sub-population at various fractional parameter α values. And we have calculated the equilibrium points as $E_6 = (M_1, M_2, T) = (3.58209, 1.71324, 14.2925)$ Additionally, graphics are produced to emphasize how changes in particular parameter values can have a significant impact on cell behavior. Considering different parameter values and fractional-order values, the dynamic patterns of the suggested skin cancer model are shown in Figures (1), (2), (3), (4), and (5). In particular, Figure (1) illustrates how the

fractional scenario affects tumor cells by showing how they behave at various α values. The tumor cells exhibit a decreasing trend as α values rise.

We have performed numerical simulations using the parameter values from Table (1) to investigate the temporal dynamics of each sub-population at various fractional parameter α values. Additionally, graphics are produced to emphasize how changes in particular parameter values can have a significant impact on cell behavior. Considering different parameter values and fractional-order values, the dynamic patterns of the suggested skin cancer model are shown in Figures (1), (2), (3), (4), and (5). In particular, Figure (1) illustrates how the fractional scenario affects tumor cells by showing how they behave at various α values. The tumor cells exhibit a decreasing trend as α values rise.

Fig. (1) examines the evolution of the active tumor cells throughout time. As can be seen in the illustration, the memory effect of the tumor cells increases when the fractional-order α lowers from the unit. In non-integer settings, these cells therefore take longer to stabilize. Furthermore, the tumor cells behave in an unstable way when α is a unit, but the system remains stable over the long run when α is not an integer, indicating one of the essential properties of the fractional-order derivatives.

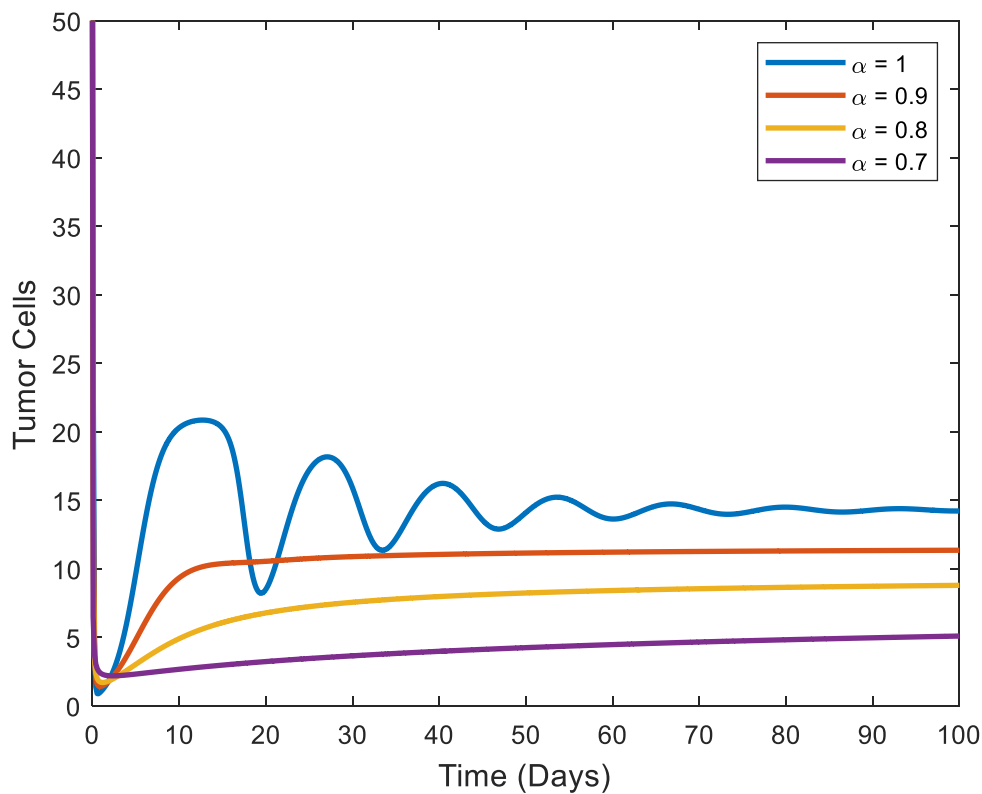


Figure 1. Change of the tumor cells over time of the varying fractional-order derivative

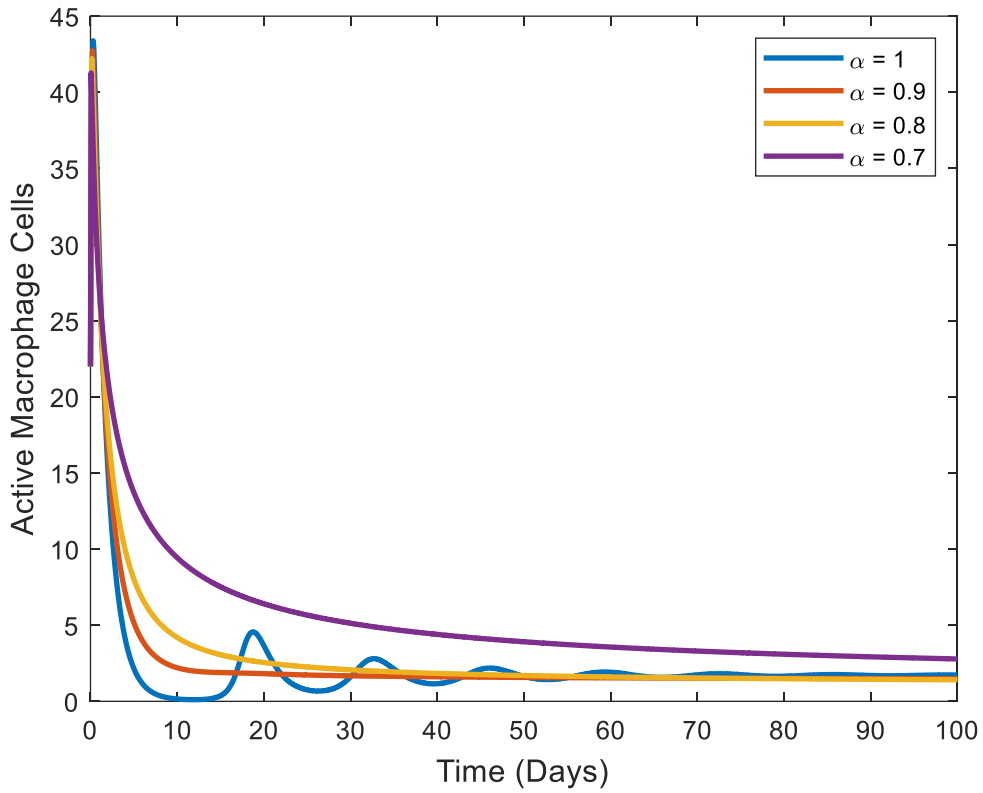


Figure 2. Change of the active macrophages cells over time of the varying fractional-order derivative

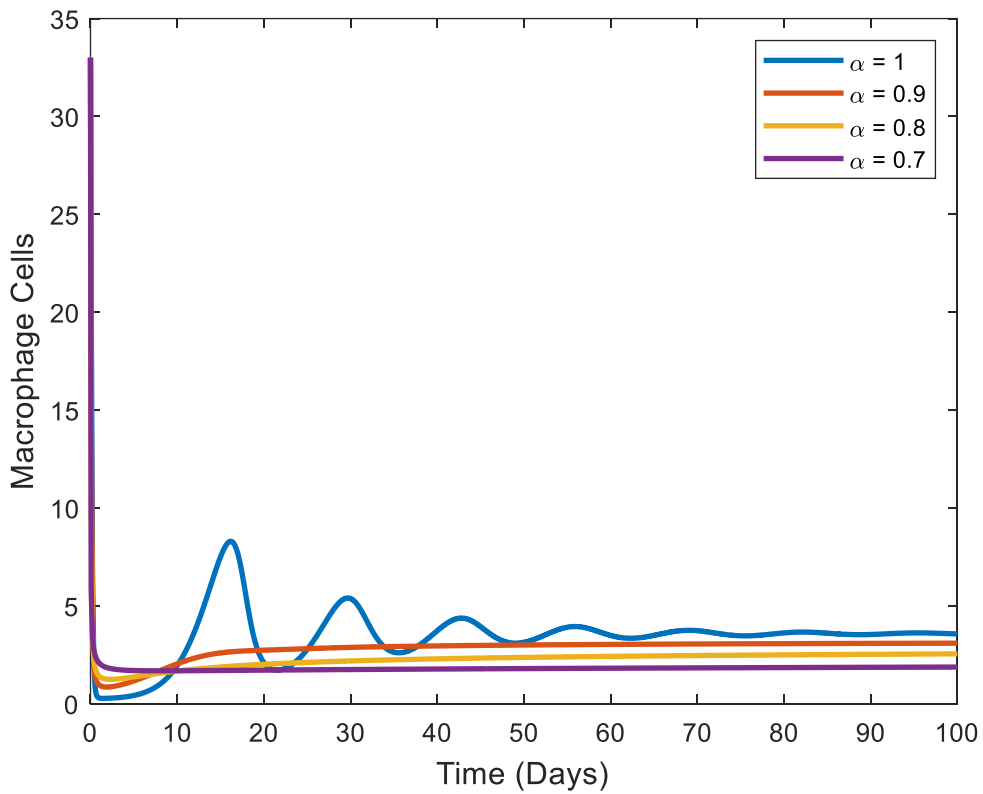


Figure 3. Change of the macrophages cells over time with the varying fractional-order derivative

Additionally, Fig. (2) shows that there are generally more active macrophage cells when $\alpha = 0.7$ than when $\alpha = 1$. As a result, the fractional order predicts a higher number of active macrophage cells than the estimate obtained in the integer-order scenario. Moreover, after 100 days, it is seen that the body still has active macrophage cells when $\alpha = 0.7$. On the eleventh day, however, it can be seen that they begin to disappear in an integer-order scenario.

The agreement between the distribution of active macrophage cells and the behavior of fractional derivatives is evident from the effect of $\alpha = 0.7$. The wider stability region of fractional differential equations compared to integer-order equations, which implies that they are at least as stable as integer-order equations, is one of the main reasons for employing FODEs. Moreover, all the necessary conditions for the existence of solutions to fractional-order equations, as stated in [24, 41], must be met. Hence, Fig. (1) provides empirical evidence supporting this theoretical finding, indicating that the stability zone of the proposed model increases as α decreases from unity.

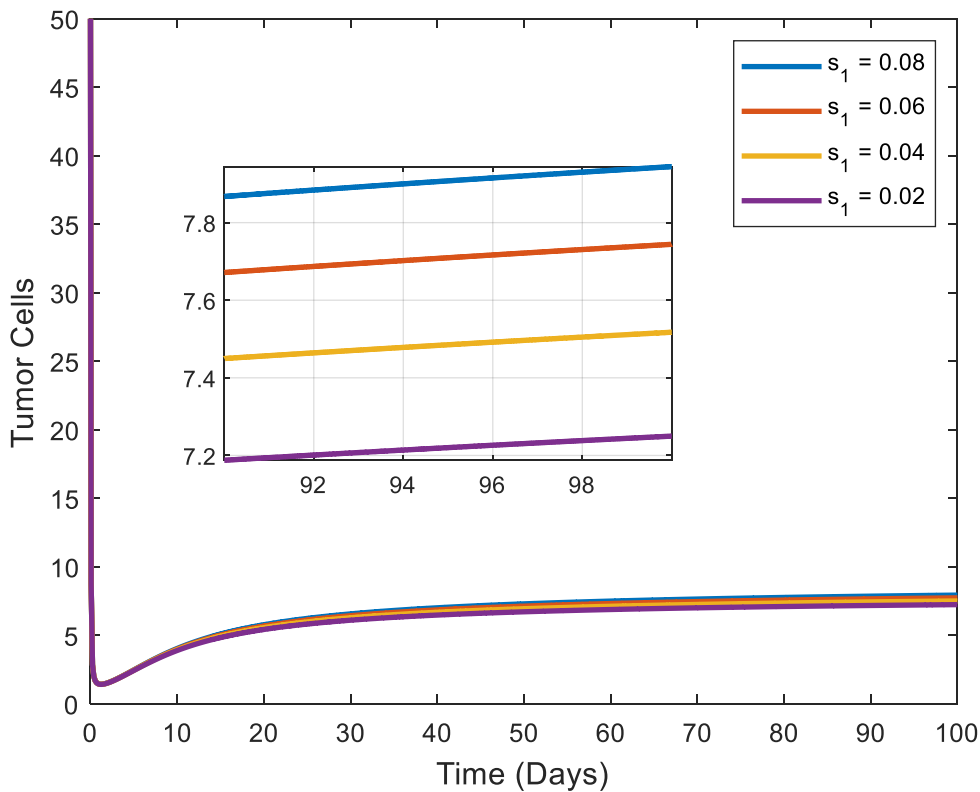


Figure 4. Change of the tumor cells over time of the different s_1 values and $\alpha = 0.8$

Figure (3) showcases a trend akin to the one witnessed in active macrophage cells. With deviations of the fractional-order parameter α from unity, there is a noticeable rise in the memory effect exhibited by macrophage cells. In the context of fractional circumstances, this rise implies a decrease in the peak count of macrophage cells, aiming towards stability over time. This behavior demonstrates how α affects the dynamics of the proposed system model for skin cancer.

Figure (4) depicts an increase in tumor cells under the fractional-order case $\alpha = 0.8$ as s_1 values increase. Similarly, in Figure (5), it can be observed that s_2 has a substantial effect on the regression of tumor cells, with an increase in s_2 resulting in an increase in the number of cancer cells.

The fractional-order derivative attenuates the oscillation behavior close to the positive equilibrium point, as seen in Figure (1). The occurrence of periodic solutions is related to cancer models. It implies that tumor levels may vary around an equilibrium point even in the absence of treatment. Clinical observations of the "Jeff's Phenomenon" have been made [42], and it has been documented in several cancer model organisms [24, 43]. As

seen in Fig. (4), the number of tumor cells grows with an increase in s_1 , and the number of tumor cells increases with an increase in s_2 in Fig. (5).

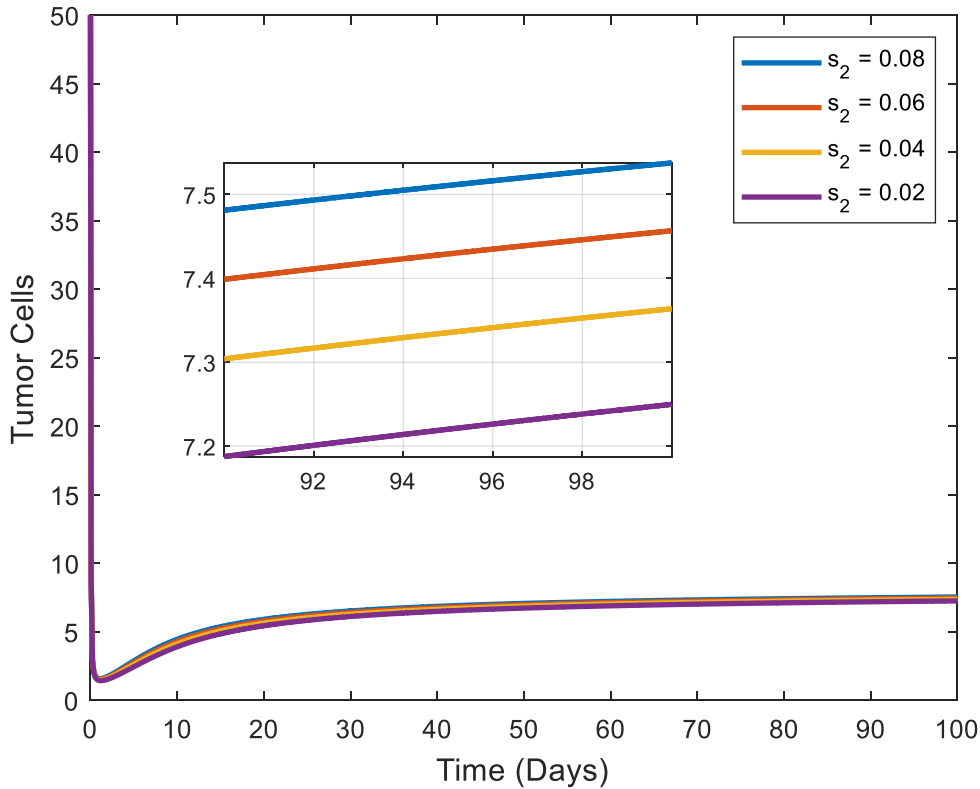


Figure 5. Change of the tumor cells over time of the different s_2 values and $\alpha = 0.8$

8. Conclusions

This paper focuses on the Caputo fractional order cancer-immune system model, which is a system of fractional differential equations (5) with Caputo fractional derivatives. We investigate the local asymptotic stability of the tumor-free and tumor-infection fixed points of the system and demonstrate that under certain conditions, the equilibrium points of the model (5) are asymptotically stable. We then examine the existence and uniqueness of the solution and provide numerical simulations to validate the theoretical results. To explore the effects of varying the fractional order derivative and to analyze the behaviour of the system, we generate figures for different α values. Our results show that as α decreases from 1, the cells reach equilibrium points more quickly, and we conclude that the Caputo fractional derivative yields more realistic results than integer order derivatives. It is observed that the density of tumor cells increases as stress increases. It is seen that the system is stable as the fractional derivative value decreases from 1, which shows that the stability region of fractional derivatives is wider than full-order derivatives. Our model differs from other studies in the literature on skin cancer by examining the relationship between stress and skin cancer. Additionally, it differs from other models in terms of the mathematical analysis presented here. Stress plays a significant role in cancer development, and our results indicate that reducing stress leads to a decrease in the number of tumors. We also observe significant changes in the number of macrophage cells, the number of active macrophage cells, and the number of tumor cells as α varies. We anticipate that this study will make valuable contributions to the fields of mathematics and medicine.

Declaration of Competing interest

The authors declared that they have no competing interests.

References

- [1] O'Sullivan, D. E., Brenner, D. R., Demers, P. A., Villeneuve, P. J., Friedenreich, C. M., King, W. D., & ComPARE Study Group. (2019). Indoor tanning and skin cancer in Canada: A meta-analysis and attributable burden estimation. *Cancer epidemiology*, 59, 1-7.
- [2] Hylands P. Skin cancer: types, diagnosis and prevention. *Heart Fail* 2019;10. p. 00.
- [3] Gray-Schopfer, V., Wellbrock, C., & Marais, R. (2007). Melanoma biology and new targeted therapy. *Nature*, 445(7130),851-857.
- [4] Morgan, R. A., Dudley, M. E., Wunderlich, J. R., Hughes, M. S., Yang, J. C., Sherry, R. M., ... & Rosenberg, S. A. (2006). Cancer regression in patients after transfer of genetically engineered lymphocytes. *Science*, 314(5796),126-129.
- [5] Nuzzo, C., Pino, M. S., & Cognetti, F. (2014). Systemic therapy in melanoma. *Skin Cancer: A Practical Approach*, 461-474.
- [6] Kirkwood, J. M., Tarhini, A. A., Panelli, M. C., Moschos, S. J., Zarour, H. M., Butterfield, L. H., & Gogas, H. J. (2008). Next generation of immunotherapy for melanoma. *Journal of Clinical Oncology*, 26(20), 3445-3455.
- [7] Dunn, G. P., Bruce, A. T., Ikeda, H., Old, L. J., & Schreiber, R. D. (2002). Cancer immunoediting: from immunosurveillance to tumor escape. *Nature immunology*, 3(11), 991-998.
- [8] Fridman, W. H., Pagès, F., Sautès-Fridman, C., & Galon, J. (2012). The immune contexture in human tumours: impact on clinical outcome. *Nature Reviews Cancer*, 12(4), 298-306.
- [9] Thomas, D. A., & Massagué, J. (2005). TGF- β directly targets cytotoxic T cell functions during tumor evasion of immune surveillance. *Cancer cell*, 8(5), 369-380.
- [10] Moutsopoulos, N. M., Wen, J., & Wahl, S. M. (2008). TGF- β and tumors-an ill-fated alliance. *Current opinion in immunology*, 20(2), 234-240.
- [11] Sun, H., Cao, D., Shen, K., Yang, J., Xiang, Y., Feng, F., ... & Song, L. (2018). Piver Type II vs. Type III hysterectomy in the treatment of early-stage cervical cancer: midterm follow-up results of a randomized controlled trial. *Frontiers in Oncology*, 8, 568.
- [12] Dougan M, Dranoff G, Dougan SK. Cancer immunotherapy: beyond checkpoint blockade. *Annu Rev Cancer Biol.* (2018) 3:55-75. doi: 10.1146/annurev-cancerbio-030518-055552
- [13] Marelli, G., Howells, A., Lemoine, N. R., & Wang, Y. (2018). Oncolytic viral therapy and the immune system: a double-edged sword against cancer. *Frontiers in immunology*, 9, 866.
- [14] Sabbar, Y., Yavuz, M., & Özköse, F. (2022). Infection Eradication Criterion in a General Epidemic Model with Logistic Growth, Quarantine Strategy, Media Intrusion, and Quadratic Perturbation. *Mathematics*, 10(22),4213.
- [15] Weinberg, R. A. (2014). Coming full circle-from endless complexity to simplicity and back again. *Cell*, 157(1), 267-271.
- [16] Kolch, W., Halasz, M., Granovskaya, M., & Kholodenko, B. N. (2015). The dynamic control of signal transduction networks in cancer cells. *Nature Reviews Cancer*, 15(9), 515-527.
- [17] Eikenberry, S., Thalhauser, C., & Kuang, Y. (2009). Tumor-immune interaction, surgical treatment, and cancer recurrence in a mathematical model of melanoma. *PLoS computational biology*, 5(4), e1000362.
- [18] Pennisi, M. (2012). A mathematical model of immune-system-melanoma competition. *Computational and mathematical methods in medicine*, 2012.
- [19] Nikolov, S., & Nenov, M. (2019). Modelling vaccine quantity in mathematical models of melanoma treatment. *Series on Biomechanics*.
- [20] Shu, Y., Huang, J., Dong, Y., & Takeuchi, Y. (2020). Mathematical modeling and bifurcation analysis of pro- and anti-tumor macrophages. *Applied Mathematical Modelling*, 88, 758-773.

- [21] Özköse, F., ŞENEL, M. T., & Habbireeh, R. (2021). Fractional-order mathematical modelling of cancer cells-cancer stem cells-immune system interaction with chemotherapy. *Mathematical Modelling and Numerical Simulation with Applications*, 1(2), 67-83.
- [22] Lai, X., & Friedman, A. (2017). Combination therapy for melanoma with BRAF/MEK inhibitor and immune checkpoint inhibitor: a mathematical model. *BMC Systems Biology*, 11(1), 1-18.
- [23] Özköse, F., Yılmaz, S., Yavuz, M., Öztürk, İ., Şenel, M. T., Bağcı, B. Ş., ... & Önal, Ö. (2022). A fractional modeling of tumor-immune system interaction related to lung cancer with real data. *The European Physical Journal Plus*, 137, 1-28.
- [24] Öztürk, I., & Özköse, F. (2020). Stability analysis of fractional order mathematical model of tumor-immune system interaction. *Chaos, Solitons & Fractals*, 133, 109614.
- [25] Carvalho, A. R., Pinto, C., & Baleanu, D. (2018). HIV/HCV coinfection model: a fractional-order perspective for the effect of the HIV viral load. *Advances in Difference Equations*, 2018(1), 1-22.
- [26] Podlubny I. *Fractional differential equations*. Academic Press, New York; 1999.
- [27] Ghaziani, R. K., Alidousti, J., & Eshkaftaki, A. B. (2016). Stability and dynamics of a fractional order Leslie-Gower prey-predator model. *Applied Mathematical Modelling*, 40(3), 2075-2086.
- [28] Petras I. *Fractional -order nonlinear systems: modeling, analysis and simulation*. London, Beijing: Springer; 2011.
- [29] Baisad, K., & Moonchai, S. (2018). Analysis of stability and Hopf bifurcation in a fractional Gauss-type predator-prey model with Allee effect and Holling type-III functional response. *Advances in difference equations*, 2018, 1-20.
- [30] Ahmed, E., El-Sayed, A. M. A., & El-Saka, H. A. (2007). Equilibrium points, stability and numerical solutions of fractional-order predator-prey and rabies models. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 325(1), 542-553.
- [31] Allen, L. J. *An introduction to mathematical biology.*, 2007. ISBN, 10, 0-13.
- [32] Özköse, F., Yavuz, M., Şenel, M. T., & Habbireeh, R. (2022). Fractional order modelling of omicron SARS-CoV-2 variant containing heart attack effect using real data from the United Kingdom. *Chaos, Solitons & Fractals*, 157,111954 .
- [33] Özköse, F. (2023). Modeling of psoriasis by considering drug influence: A mathematical approach with memory trace. *Computers in Biology and Medicine*, 107791.
- [34] Özköse, F. (2023). Long-Term Side Effects: A Mathematical Modeling of COVID-19 and Stroke with Real Data. *Fractal and Fractional*, 7(10),719.
- [35] Özköse, F., Habbireeh, R., & Şenel, M. T. (2023). A novel fractional order model of SARS-CoV-2 and Cholera disease with real data. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 423, 114969.
- [36] Diethelm, K., & Freed, A. D. (1998). The FracPECE subroutine for the numerical solution of differential equations of fractional order. *Forschung und wissenschaftliches Rechnen*, 1999, 57-71.
- [37] Diethelm, K. (1997). An algorithm for the numerical solution of differential equations of fractional order. *Electronic transactions on numerical analysis*, 5(1), 1-6.
- [38] Garrappa, R. (2010). On linear stability of predictor-corrector algorithms for fractional differential equations. *International Journal of Computer Mathematics*, 87(10), 2281-2290.
- [39] Garrappa, R. (2018). Numerical solution of fractional differential equations: A survey and a software tutorial. *Mathematics*, 6(2), 16.
- [40] Li, C., & Tao, C. (2009). On the fractional Adams method. *Computers & Mathematics with Applications*, 58(8),1573-1588.
- [41] Rihan, F. A., & Velmurugan, G. (2020). Dynamics of fractional-order delay differential model for tumorimmune system. *Chaos, Solitons & Fractals*, 132, 109592.
- [42] R.H. Thomlinson, Measurement and management of carcinoma of the breast. *Clin.Radiol.* 33(5), 481-493 (1982).
- [43] Sarkar, R. R., & Banerjee, S. (2005). Cancer self remission and tumor stability—a stochastic approach. *Mathematical Biosciences*, 196(1), 65-81.