

ISSN 1012-2354



ERCIYES ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ

ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

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

Cilt (Vol.): 39

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

Editörler

Prof. Dr. M. Duran TOKSARI, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. M. Gökhan HALICI, Erciyes Üniversitesi

Düzenleme Editörleri

Hüseyin ÖZKAYA

Ali Yankı TEKOL

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. Mehmet AKKURT, Erciyes Üniversitesi, akkurt@erciyes.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. Kamil KOÇ, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, kamil.koc@cbu.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

Doç. Dr. Ömer AYDIN, Erciyes Üniversitesi, omeraydin@erciyes.edu.tr

Doç. Dr. Emrah TIRAŞ, Erciyes Üniversitesi, emrahtiras@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 PAPAJORGJË, 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 39, Sayı 2, Hakem Kurulu

Prof. Dr. Abdulkadir BİLİŞİK, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Abdulkadir KAN, Atatürk Üniversitesi

Prof. Dr. Galip SEÇKİN, Çukurova Üniversitesi

Prof. Dr. Hasbi YAPRAK, Kastamonu Üniversitesi

Prof. Dr. İdris ÖREN, Karadeniz Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Nuray ATEŞ, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Sabri KOÇER, Necmettin Erbakan Üniversitesi

Prof. Dr. Tuğrul OKTAY, Erciyes Üniversitesi

Doç. Dr. Bahatdin DAŞBAŞI, Kayseri Üniversitesi

Doç. Dr. Bülent KIRKAN, Afyonkarahisar Sağlık Bilimleri Üniversitesi

Doç. Dr. Fatih ÖZYURT, Fırat Üniversitesi

Doç. Dr. Fırat EVİRGEN, Balıkesir Üniversitesi

Doç. Dr. Hüseyin ERTAP, Kafkas Üniversitesi

Doç. Dr. İbrahim AKTAŞ, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi

Doç. Dr. Md SYDUZZAMAN, Bangladeş Tekstil Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet BİLİM, Nuh Naci Yazgan Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet YAVUZ, Necmettin Erbakan Üniversitesi

Doç. Dr. Mert TERZİ, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Doç. Dr. Ömer SEÇGİN, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Doç. Dr. Ömür GÖKKUŞ, Erciyes Üniversitesi

Doç. Dr. Özcan BEKTAŞ, Samsun Üniversitesi

Doç. Dr. Sencer Süreyya KARABEYOĞLU, Kırklareli Üniversitesi

Doç. Dr. Süleyman EKEN, Kocaeli Üniversitesi

Doç. Dr. Şemsi Eken MERİÇ, Mersin Üniversitesi

Doç. Dr. Yunus KAYIR, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Yuşa ŞAHİN, Yozgat Bozok Üniversitesi

Doç. Dr. Zeynep Mine HASDEMİR, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Doç. Dr. Zühal KÜÇÜKARSLAN YÜZBAŞI, Fırat Üniversitesi

Doç. Dr. Ahmet ERDEM, Kocaeli Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Alper SOLMAZ, İskenderun Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Burcu KIR SAVAŞ, Kocaeli Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Cihan ÖZGÜR, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Fatih AVCIL, Bitlis Eren Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Gülşen ORUCOVA BÜYÜKÖZ, Necmettin Erbakan Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Hamdi MURATÇOBANOĞLU, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Harun YANAR, Karadeniz Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Hasan Hüseyin BİLGİÇ, Necmettin Erbakan Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Hasan ZORLU, Erciyes Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin ÖZDEMİR, Gaziantep Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi İshak PAÇAL, Iğdır Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Mikail TEMİREL, Abdullah Gül Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Nuh AZGINOĞLU, Kayseri Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ökkeş Gökalg SÖKMEN, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Öztürk Özdemir KANAT, Kastamonu Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Tuğçem PARTAL, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Yunus Ziya KAYA, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi

Dr. Öğr. Gör. Yakup BÖLÜKBAŞ, Aksaray Üniversitesi

Dr. Arif Engin ÇETİN, İzmir Biyotıp ve Genom Merkezi

Arş. Gör. Volkan ALA, Mersin Üniversitesi

Arş. Gör. Bestami TAŞAR, İskenderun Teknik Üniversitesi

Arş. Gör. Aykut HAS, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Cilt: 39 Sayı: 2

Ağustos 2023

İçindekiler

Sayfalar	Makaleler	Türü
150-162	Uçuşa Elverişlilik İçin Derin Öğrenme Tabanlı Pist Yüzeyi Çatlak Tespiti Yaklaşımı	Araştırma Makalesi
163-171	Çelik Tel ve Cam Elyaf Ağları ile Takviye Edilmiş Tabakalı Beton Kompozitlerin Eğilme Dayanımı	Araştırma Makalesi
172-182	Investigation and Comparison of Process Parameters for Advanced High Strength Steels for Next-Generation Vehicles	Araştırma Makalesi
183-191	Fluid-structure coupled simulation-based investigation and thrust/efficiency calculation for a UAV twin-blade propeller	Araştırma Makalesi
192-203	A conceptual system proposal for real-time detection of jellyfish density in coastal areas from UAV images	Araştırma Makalesi
204-216	SPT-CPT İlişkisinin Yapay Zeka Desteğiyle Çeşitli Zemin Tipleri İçin Araştırılması	Araştırma Makalesi
217-222	Production of Silica Coated Cobalt Nanoparticles Via A Synthetic Nanofabrication Method	Araştırma Makalesi
223-234	Bio-removal of Remazol black 5 dye by Allium scorodoprasum L. biomass; isotherms, kinetic and thermodynamic studies	Araştırma Makalesi
235-240	Difference Sets from Quadratic Residues	Araştırma Makalesi
241-252	A Numerical Approach for Quantifying Bi-directional Interactions between Macro Economic Indicators and Construction Industry	Araştırma Makalesi
253-270	Fractional Mathematical Modelling of The Spread of Rotavirus Disease	Araştırma Makalesi
271-290	Altın Madenciliğinde, Yığın Liç Alanlarının Rehabilitasyonunda Yeraltı Suyu ile Yıkama Yaklaşımının Değerlendirilmesi	Araştırma Makalesi
291-302	Bir Rüzgâr Türbinine ait Kanat Hatve Açısının AHA Tabanlı PID Tipi Denetleyiciler ile Optimal Kontrolü	Araştırma Makalesi
303-314	Kapalı Formda Temsil Edilen Cebirsel Düzlem Eğrilerinin İzometrilere ve Simetrisinin Hesaplanması	Araştırma Makalesi
315-329	The New Conformable Methods to Solve Fractional Partial Differential Equations	Araştırma Makalesi
330-341	Characterizations of Polypropylene Pile Fiber in Three-Dimensional (3D) Carpet under Flexure and Static Loading	Araştırma Makalesi
342-349	Farklı SUVA Değerine Sahip Sulardan Karbon Nanotüpler ile Doğal Organik Maddenin Adsorptif Giderimi	Araştırma Makalesi

*Cilt 39, 2. sayımızın yayın sürecinde,
"Uçuşta Elverişlilik İçin Derin Öğrenme
Tabanlı Pist Yüzeyi Çatlak Tespiti Yaklaşımı"
isimli makalenin sorumlu yazarlarından
Nurcan SARIKAYA BAŞTÜRK'ün vefatını
derin bir üzüntüyle öğrendik,
kendisini rahmetle anıyoruz.*

Uçuşa Elverişlilik İçin Derin Öğrenme Tabanlı Pist Yüzeyi Çatlak Tespiti Yaklaşımı

Nurcan Sarıkaya Baştürk^{*1}, Fatmanur Güven²

*¹ Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fak., Havacılık Elektrik ve Elektronik Bölümü, KAYSERİ
² Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivil Havacılık ABD, KAYSERİ

(Alınış / Received: 19.06.2023, Kabul / Accepted: 17.07.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 31.08.2023)

Anahtar Kelimeler

Uçuşa Elverişlilik,
Pist Yüzey Denetimi,
Derin Öğrenme,
Evrişimli Sinir Ağları

Öz: Uçuş emniyeti, havacılık endüstrisindeki önemli konulardan biridir. Uçuş emniyetini doğrudan etkileyen hususlardan biri ise uçuş pistlerinin yüzey şartlarıdır. Pistlerin yüzey şartlarının denetim ve kontrolleri güvenli bir uçuş için büyük önem arz eder. Pist yüzeylerinde denetlenen başlıca durumlar, çatlama, kırılma, kopma, açılma ve kabarma gibi zemin hasarlarıdır. İlgili denetimsel işlemler zaman alıcı süreçler olup, alanında eğitim almış uzman personel tarafından yapılmaktadır. Derin öğrenme, son yıllarda popülerliği oldukça artan bir makine öğrenmesi yaklaşımıdır. Bu çalışmada, uçuş pistlerinin yüzeylerindeki çatlaklıkların tespitini yapmak amacıyla iki farklı derin öğrenme modeli geliştirilmiştir. İlk model bu çalışmaya yönelik baştan tasarlanan ve sıfırdan eğitilen özgün bir evrişimli sinir ağı iken; ikinci model AlexNet mimarisinin öğrenme aktarımı yoluyla bu çalışmaya özgü eğitilmiş sürümüdür. Modeller, veriler üzerinde test edilmiş ve elde ettikleri başarı oranları raporlanmıştır.

Deep Learning Based Runway Surface Crack Detection Approach For Airworthiness

Keywords

Airworthiness,
Runway Surface Inspection,
Deep Learning,
Convolutional Neural Networks

Abstract: Flight safety is one of the important issues in the aviation industry. One of the issues that directly affects flight safety is the surface conditions of the runways. Inspection and control of runway surface conditions are of great importance for a safe flight. The main conditions inspected on runway surfaces are ground damages such as cracking, breaking, rupture, opening and heaving. The related inspection procedures are time-consuming processes and are carried out by specialized personnel trained in the related field. Deep learning is a machine learning approach that has become increasingly popular in recent years. In this study, two different deep learning models are developed to detect cracks on the surface of runways. The first model is a pure convolutional neural network designed and trained from scratch for this study, while the second model is a version of the AlexNet architecture trained for this study through transfer learning. The models were tested on the data and their success rates were reported.

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

1. Giriş

Uçuşa elverişlilik, hava araçlarının ve bu araçların uçuş güvenliklerini etkileyecek koşulların uçuşa uygun olup olmadığının kontrolüdür. Yapılan test, bakım ve gözetimlerin ardından hava aracının uçuşa elverişli olup olmadığı belirlenir. Uçuşa elverişlilik için belirlenen temel bazı kurallar vardır. Ülkemizde bu kuralların sorumluluğu Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü'ne bağlıdır.

Uçuşa elverişlilikteki eksiklikler, bir olay ya da kazaya sebebiyet verebilirler. Uçuşa elverişlilik için can ve mal güvenliğini sağlamak adına en önemli faktörlerden birisi pist yüzey şartlarıdır. Pist yüzeyi, daimî olarak denetim ve kontrol altında tutulmalıdır. Pist yüzeyi kontrollerindeki yüzey çatlakları uçuşa elverişlilik için büyük önem arz eder. Tespit edilen çatlaklar ilgili birimlerce en kısa sürede onarılmalı ve kayıt altına alınarak muhafaza edilmelidir. Uçuş pistleri, yüzey yapısı, kullanılan malzeme vb. gibi çeşitli açılardan uçuş güvenliğini doğrudan

etkiler. Yüzey pürüzleri, uçak manevraları ya da kontrolleri esnasında aşırı sallanmaya, titremeye veya sair zorluklara sebep olabilir, kalkışı ve inişi olumsuz yönde etkileyebilirler [1]. Pist yüzeyleri, frenleme kaybına ve bahsedilen olumsuzluklara sebebiyet vermeyecek biçimde inşa edilmelidir.

Yapay zekâ, günümüzde gelişimini hızlı bir şekilde sürdürmektedir. Yapay zekânın bir alt dalı olan derin öğrenme, girdi olarak beslenen görüntü ya da farklı türden işaretler için efektif sonuçlar üreten etkili bir yöntemdir. Derin öğrenme, diğer modellerle karşılaştırıldığında en büyük farkı kullanıcının girdi verilerini belirlemesinin ardından, çalışma, kontrol, sonuç üretme kısımlarının çoğunlukla modele ait olmasıdır. Bundan dolayı görüntü sınıflandırma, ses tanıma, nesne tanıma ve nesne takibi gibi birçok alanda başarılı sonuçlar vermektedir. Bu özelliklerinden faydalanarak, uçuş pistleri ve diğer farklı yüzeylerin kusurlarını tespit etmek ve sınıflandırmak için kullanılabilirler mümkündür [2].

Yazgan ve Yılmaz [3]; insan faktörü risklerini yönetmeye bağlı olarak havayollarının sürdürülebilir uçuşa elverişlilik stratejileri hakkında bilgi vermişlerdir. Aktif yönetim teknolojisi (AMT) hatasını etkileyen alt kriterlerin önceliklendirilmesi için geliştirilen analitik ağ süreci (ANP) modeli oluşturmuşlardır. AMT hatasına katkıda bulunan toplam 15 önemli kriter ANP modeline dahil edilmek üzere üç ana kümede seçilmiştir. Sonuçlar, bağımlılıklar dikkate alındığında AMT hatasını etkileyen kriterlerin teknisyen performansı üzerindeki etkisini göstermekte ve çok kriterli karar verme analizinde insan performansını etkilemede karşılıklı bağımlılıklarını dikkate almanın önemini vurgulamıştır.

Tatlı [4]; meteorolojik açıdan uçuşa elverişlilik ölçütlerini saptamış ve günlük uçuşa elverişli saatleri ele alarak zaman serileri elde etmiştir. Elde ettiği zaman serilerini, yapay sinir ağı (YSA) yönteminde kullanarak uçuşa elverişli saat miktarı tahminini gerçekleştirmiştir.

Wang vd. [5]; güvenli olmayan olaylar için uçuş oranı tahminini, büyük verinin özelliklerini göz önünde bulundurarak derin öğrenme temelinde önermişlerdir. Önerilen yöntemin, gri sinir ağı yöntemi, destek vektörü regresyonu, derin inanç ağları ile karşılaştırıldığında uçuş oranını tahmin etmekte daha üstün olduğu belirtilmiştir.

Inacio vd. [6]; bir havaalanının gözetimi için tespit edilen nesnelere sınıflandırmışlardır. Tüm süreç, bir nesne algılama aşaması ve ardından bir sınıflandırma aşamasını içermiştir. Algoritma verimliliğini göstermek amacıyla deneysel sonuçları da paylaşmışlardır.

Tsai vd. [7]; havaalanı pisti banketlerinde çatlak sızdırmazlık maliyetini doğru bir şekilde tahmin etmek için, 3D çizgi lazer görüntüleme teknolojisi, otomatik çatlak tespiti ve genişlik ölçüm algoritmalarını kullanan otomatik bir yaklaşım önermişlerdir. Önerilen yöntem kullanılarak, Hartsfield Jackson Atlanta Uluslararası Havalimanı'nda 30,5 m (100 ft) bir pist omzu üzerinde bir vaka çalışması gerçekleştirilmiştir. Sonuçta önerilen yöntemin, maliyet etkin ve güvenilir bir şekilde otomatik bir yaklaşım sağlamak için çok umut verici olduğunu belirtmişlerdir.

Yang vd. [8]; derin öğrenmedeki son gelişmelerden esinlenerek, yeni bir ağ mimarisi önermişlerdir. Önerilen ağ, bir özellik piramidinde çatlak tespiti için bağlam bilgisini düşük seviyeli özelliklere entegre etmiştir. Ağın üstünlüğünü ve genellenebilirliğini, üzerinde çalıştıkları birbirinden farklı beş çatlak veri setiyle desteklemiştir.

Xie vd. [9]; havalimanı pist denetimi için gereken maliyeti ve zamanı azaltmak için drone ile yakalanan görüntülere dayalı olarak kaplama çatlak segmentasyonu için U-Net derin sinir ağını kullanmışlardır. Massachusetts'teki Fitchburg Municipal Havalimanı'ndan pist kaplama görüntülerini çeşitli yüksekliklerde drone kullanarak elde etmişler ve yakalanan drone görüntülerini, U-Net modelinin çatlak segmentasyon performansını değerlendirmek için kullanmışlardır. Sonuçlar, U-Net'in sınırlı eğitim görüntüleri ile bile test verileri üzerinde iyi performans gösterdiğini ve bunun iyi bir genelleme kabiliyetine sahip olduğunu göstermiştir.

Peng vd. [10]; havaalanı pist kaplaması çatlak tespitinde, pist kaplamasındaki işaretlemenin genellikle çatlak tespitini bozacağını ifade ederek iki eşikli bölütleme teknolojisine dayanan çatlak tespitini sunmuşlardır. İlk olarak, geliştirilmiş Otsu eşik segmentasyon algoritması kullanılarak pist görüntüsündeki yol işaretleri kaldırılmış, ardından çatlak görüntüsünü elde etmek için geliştirilmiş uyarlanabilir yinelemeli eşik bölütleme algoritması tarafından bölümlere ayrılmıştır. Yöntemin, yol işaretlemesi içeren pist görüntülerindeki çatlak etkili bir şekilde tespit edebildiğini, simülasyon deneyleri ile kanıtlamışlardır.

Jo ve Jadidi [11]; herhangi bir otonom araçta kullanılabilir yeni bir otonom çatlak tespit sistemi önermişlerdir. Otonom çatlak tespit sistemi, görüntü elde etme, görüntü işleme ve sınıflandırma şeklinde üç aşamadan oluşturulmuştur. Uygulama için çatlaklı veya çatlaksız 15000 RGB ve kızılötesi görüntü kullanmışlardır. Sonuçlar, önerilen sistemin yüksek hassasiyetli olduğunu göstermiştir.

Gopalakrishnan vd. [12]; milyonlarca görüntü içeren ImageNet veri tabanı üzerinde eğitilmiş bir evrişimli sinir ağı (CNN) kullanarak sıcak karışım asfalt ve portland çimento betondaki çatlakları otomatik olarak algılamayı hedeflemişlerdir. Farklı yüzey özelliklerine sahip sıcak karışım asfalt yüzeyli ve portland çimento beton yüzeyli birleşik görüntüler üzerine bir sınıflandırıcı eğitmeye çalışılmıştır. ImageNet, VGG16 CNN özellikleri üzerinde eğitilmiş tek katmanlı bir sinir ağı sınıflandırıcısı olarak iyi bir performans vermiştir.

Qurishee vd. [13]; çatlak ve çatlak olmayan tip yapıyı otomatik olarak tespit etmek için bir CNN geliştirmişlerdir. Bridge Kirder'da derin öğrenmeyi uygulamaya yönelik bir pilot çalışma olarak, UTC kampüsü eski garaj beton tavan döşemesinin yapısındaki çatlağın tanınmasını, uzunluğunu ve yerini incelemişlerdir. UTC Old Library otopark tavanından toplam 2086 çatlak ve çatlak olmayan görüntü alınmıştır. Model, çatlaklı ve çatlaksız yapı türlerinde %98 doğruluk göstermiştir.

Gopalakrishnan [14]; derin öğrenme konusunda yakın zamanda yayınlanmış çalışmalarını incelemişlerdir. Derin öğrenme yazılım çerçeveleri, ağ mimarisi, her çalışma tarafından kullanılan hiper parametreler ve çatlak algılama performansı üzerinde durarak kaldırım veya kaplama bağlamında daha fazla araştırma yapmak isteyenler için iyi bir temel oluşturmasını beklediğini dile getirmiştir.

Gopalakrishnan vd. [15]; sivil altyapının çatlak hasarı tespiti için öğrenme aktarımlı önceden eğitilmiş derin öğrenme modellerinin İHA görüntülerine yönelik kullanımını önermişlerdir. Önerilen yaklaşımın sağlamlığını, eğitim ve doğrulama sırasında kullanılmayan karmaşık UAV kaynaklı altyapı görüntüleri üzerinde test etmişlerdir. Sonuçlar, önerilen yöntemin herhangi bir büyütme ve ön işleme gerek duymadan gerçekçi durumlarda çatlakları bulmada hızlı ve kolay bir şekilde %90'a varan doğruluk elde edebileceğini göstermiştir.

Cha vd. [16]; kusur özelliklerini hesaplamadan beton çatlaklarını tespit etmek için CNN tabanlı bir yöntem önermişlerdir. Tasarlanmış CNN, 256×256 piksel çözünürlükteki 40K görüntü üzerinde eğitilmiş ve sonuç olarak yaklaşık %98 doğruluk sağlamıştır. Geleneksel Canny ve Sobel kenar algılama yöntemleri kullanılarak önerilen CNN'nin performansını incelemek için karşılaştırmalı çalışmalar yapılmıştır.

Coca vd. [17]; binalarda ulaşılması zor veya insan hayatını tehlikeye atacak çatlakları tespit eden bir uygulama sunmuşlardır. Uygulama mimarisi CNN üzerine kuruludur. İnsan performansını iyileştirmek ve çatlak algılama sürecini otomatikleştirmek için bu uygulamanın geliştirildiği belirtilmiştir.

Ha vd. [18]; derin öğrenme tabanlı nesne algılama tekniklerinden olan Mobilenet-SSD'nin, çatlak türlerinin ve çatlak alanlarının eş zamanlı algılanmasını etkili bir şekilde otomatikleştirmek için kullanıldığı bir yöntemi ele almışlardır. Yol çatlakları için nesne algılamanın doğruluğunu artırmak amacıyla, girdi görüntüsünün otomatik bölümlenmesi ve nesne algılama modeli için U-Net'i birleştirmek üzere birkaç deney yapılmıştır. U-Net ile görüntü maskeleyen, 0,9315 mAP değeri ile nesne algılama performansını en üst düzeye çıkarabileceği vurgulanmıştır.

CNN tabanlı çatlak tespit teknikleri temel olarak iki gruba ayrılır. İlk grup olan blok düzeyinde algılama, çatlak yamalarının algılanmasına ve üzerlerinde sınırlayıcı kutular sağlanmasına dayanır. İkinci grup olan piksel düzeyinde algılama ise çatlakların piksel düzeyinde algılanmasını temel alan çatlak segmentasyonuna (delineation) dayanır. Yang vd. [19] ve Ni ve Zhang [20] gibi piksel düzeyinde algılama kategorisinde görece yeni çalışmalar ve Ronneberger vd. [21] gibi daha önce yapılan çalışmalar literatürde mevcuttur. Ni ve Zhang [20] tarafından yapılan çalışmada, bir çatlak tanımlama ağının kombinasyonu ile bir GoogLeNet mimarisi kullanılmıştır. GoogLeNet, başarılı bir özellik çıkarıcı olarak ardışık düzende özellik çıkarma ve algılama sağlamıştır. Araştırmadaki veri seti görüntü boyutu, maksimum çözünürlüğe sahip 1200×2000 piksel olan veri seti aksine yüksek çözünürlüklü bir veri seti olarak kabul edilen 4000×6000 pikseldir. Ronneberger'de [21] benzer piksel düzeyinde çatlak tanımlama yaklaşımlarını kullanmıştır. Bu çalışmalarda çatlak açıklıkları segmente edilmiştir.

Cha vd. [22] somut görüntülerdeki çatlakları tespit etmek için bir derin öğrenme yaklaşımı önermiştir. Bu çalışmada sonuçlar Canny ve Sobel kenar algılama algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. Önerilen CNN'nin doğruluğu iyileştirdiği gösterilmiştir. CNN'lerin kullanılmasının genellemeyi arttırdığı ve verilerdeki gürültünün etkisinin azaltıldığı vurgulanmıştır. Yazar, veri setlerinde %97'nin üzerinde test doğruluğu sağlamıştır.

Benzer şekilde, Zhang vd. [23]'de bir CNN modeli uygulanmıştır. Önerilen CNN mimarisinin yapısında dört evrişim katmanı, bir maksimum havuzlama katmanı ve iki tam bağlantılı katman kullanılmıştır. SVM gibi klasik makine öğrenme metotlarıyla karşılaştırıldığında, önerilen mimari üstyapı çatlak tespit etme veri setinde başarılı bir doğruluk (0.925) sağlamıştır.

Yol hasar incelemesi çalışmasında Maeda vd. [24], yol yüzeyinden veri toplamak için akıllı telefonlar kullanmıştır. Önerilen yöntem, kendi alanı üzerinde bir sınırlayıcı kutu sağlayarak sekiz sınıfı tespit edebilmektedir.

Diğer bir çalışmada Makantasis vd. [25], CNN'nin ilk katmanı olarak düşük seviyeli özneliklerin çıkarılmasını ve verinin ileri beslenmesini önermiştir. Bu uygulama %88,6 doğruluk sağlamıştır.

Sivil altyapıların denetimine ilişkin bir araştırmada Stentoumis vd. [26], bilgisayarlı görme teknikleri ve CNN'leri kullanarak beton tünel çatlaklarının tespiti üzerine bir araştırma yapmıştır. Bu çalışmada, gürültü giderme, düz çizgilerin kaldırılması, eğri tespiti, Hough dönüşümü yoluyla şekil filtreleme ve morfolojik yeniden yapılandırma dahil olmak üzere CNN'ler için ön işleme adımları olarak birkaç akıllı ürün etiketleme (IPT) kullanılmıştır. Çalışma, IPT'lerin CNN'lerle birlikte kullanılmasının daha yüksek sınıflandırma doğruluğu sağladığı göstermiştir.

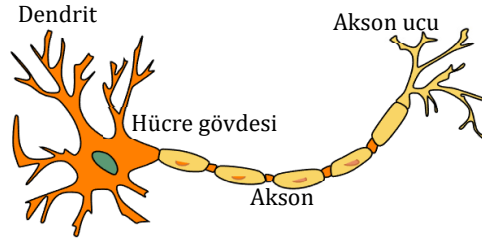
Ülkemizde yapılan bir çalışmada ise Orta Doğu Teknik Üniversitesi'ndeki binaların beton yüzeylerinden derlenen ve 20000 çatlaklı ve 20000 çatlaksız görüntüden oluşturulan bir veri seti kullanılmıştır. Veri seti, ResNet-50, VGG-16, Inception-V3, Xception, MobileNet, ShuffleNet, EfficientNet mimarilerinin eğitimlerinde kullanılmış ve görece az ya da çok sayıdaki ağ parametresinin doğruluğu etkileme durumları araştırılmıştır [27].

Bu çalışmada, uçuşa elverişlilik için pist yüzeyi çatlak tespiti amacıyla farklı derin öğrenme modelleri eğitilmiştir. İkinci bölümde, derin öğrenme hakkında genel bilgi verilmiştir. Derin yapay sinir ağlarının imge verileri gibi çok boyutlu veriler için özelleştirilmiş hali olan CNN detaylı bir şekilde ele alınarak veri sınıflandırmada nasıl kullanıldığı hakkında bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde geliştirilen modeller ve elde ettikleri başarı oranları sunulmuştur. Son bölümde ise sonuç ve öneriler sunulmuştur.

2. Materyal ve Metot

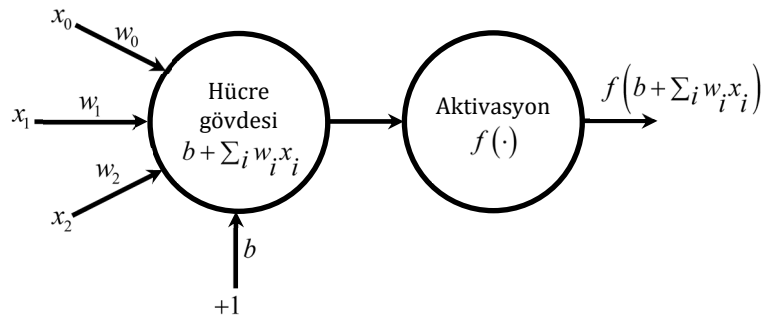
2.1. Yapay Sinir Ağları

YSA'ları canlı beyni taklit eden bir yaklaşımdır. Bu konuda ilk çalışma matematikçi Pitts ve nörofizyolog McCulloch tarafından 1943 yılında insan beynindeki nöronların çalışma prensibinin bir sinir ağı oluşturularak matematiksel olarak modellenmesiyle yapılmıştır [28]. Daha sonraki zamanlarda makine öğrenme çalışmalarında başarılı sonuçlar elde edebilmek amacıyla YSA'ları mühendisliğin bir konusu olmuştur. YSA'nın çalışma mantığını kavrayabilmek için ilk olarak biyolojik sinir sistemi hücre yapısını incelemek gerekir.



Şekil 1. Biyolojik sinir hücresi

Biyolojik bir sinir hücresi nöron olarak adlandırılır. Nöronlar Şekil 1'de görüldüğü üzere üç temel yapıdan oluşur. Başka nörondan gelen bir bilgi dendritler aracılığıyla hücre gövdesine, hücre gövdesinden de akson ve akson kollarına iletilir. Bir nöronun akson ucu ile diğer nöronun dendriti arasında sinaptik bir boşluk bulunmaktadır. Burada akson kolları diğer nöronların dendritlerine sinapslar ile bağlanmaktadır. Öğrenme sürecinde ise bilgi elektriksel sinyallerle diğer nörona iletilmektedir [29].



Şekil 2. Yapay sinir hücresine ait matematiksel model

Bir sinir hücresinin matematiksel modeli Şekil 2’de gösterilmiştir. Akson boyunca ilerleyen sinyallerden biri olan x_0 ele alınır. İlgili sinaps ağırlığı w_0 'dır ve hücre gövdesine bu girişten gelen katkı çarpımsal (ağırlıklandırılmış) biçimde $w_0 x_0$ olmaktadır. Ağırlıklar öğrenilebilir (ayarlanabilir) değerlerdir ve böylece bir nöronun diğer nörona etkisi kontrol edilebilir. Burada b parametresi ise sabit bir bias değeridir. YSA modellerinde w ve b parametreleri değiştirilerek en iyi doğruluk sonucu elde edilinceye kadar model eğitilir. Hücre gövdesinde toplanan sinyaller aktivasyon fonksiyonundan geçirilerek elde edilen çıktı diğer nörona iletilir. Çıkışta hesaplanan sonuçtan yola çıkarak w ve b değerleri sürekli bir biçimde en iyilenerek YSA modelinden olabilecek en düşük hataya sahip çıkış değerleri elde edilmeye çalışılır [30].

2.2. Derin Öğrenme

Derin öğrenme, insan zekâsından esinlenerek ortaya çıkarılmış yapay zekânın bir alt dalıdır. Biyolojik nöronların taklit edilmesiyle YSA'ları tasarlanmış, beraberinde insanın öğrenme davranışları incelenerek derin öğrenme yaklaşımları geliştirilmiştir. Derin öğrenme yaklaşımlarının temeli, hiyerarşik bir düzende birbiri üzerine yığılmış çeşitli katmanlardan oluşan sinir ağlarına dayanmaktadır [31].

Bir makine öğrenmesi alt sınıfı olan derin öğrenme, özellik çıkarma ve dönüştürme işlemleri için çok sayıda doğrusal olmayan işlem birimi katmanı kullanır. Birbiri ile ardışık her katman, kendinden önceki katmandaki çıktıyı girdi olarak alarak senkron şekilde ilerler [32].

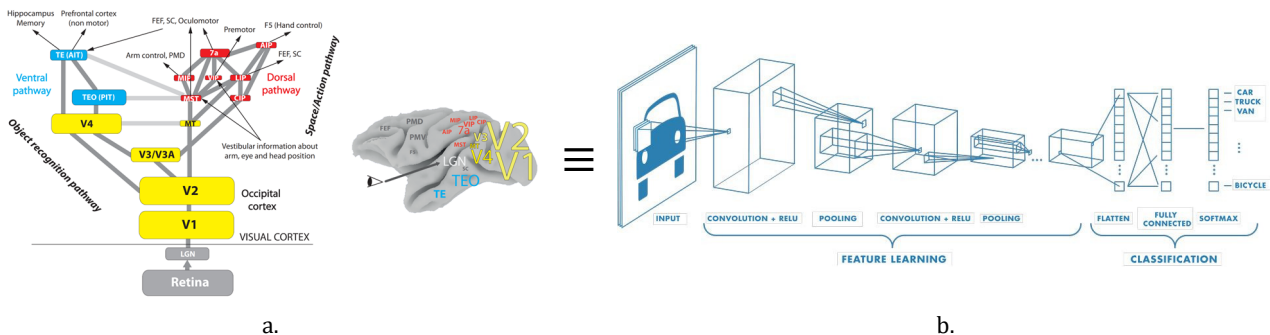
Her biri daha güçlü seviyedeki temsilleri ile sınıflandırma işlemini gerçekleştirmek için mühim olan ve alakasız çeşitlemeleri bastırma yönlerini güçlendirerek girdinin ayrımını yapar. Örnek olarak bir görüntü girdisinin ilk katmanındaki öğrenilen özelliği, girdinin belirli yönlerde ve pozisyonlardaki kenarların varlığı veya yokluğudur. İkinci katman kenar konumlarındaki ufak değişimlere bakılmaksızın belli kenar dizilişlerini saptayarak örüntü ve desenleri algılar. Üçüncü katman, desenleri, bilinen parçalara karşılık gelecek şekilde daha büyük kombinasyonlar oluşturarak birleştirebilir ve sonrasında katmanlar, bu parçaların birleşimleri olarak nesnelere kavrayabilir. Derin öğrenmenin en büyük avantajı, bu katmanların kullanıcı tarafından tasarlanmayıp genel bir öğrenme yöntemiyle verilerden öğrenilmesidir [33].

Derin öğrenmede giriş verilerinin metin, ses veya piksel verileri gibi analog olması daha başarılı sonuçlar ortaya koyar [34]. Yüz tanımda, parmak izi okuyucularda, ses tanımda, sürücüsüz arabalarda ve güvenlik kameraları gibi birçok alanda derin öğrenme yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca günümüzde kamera sayılarının artışıyla birlikte sayısal veride fazlaca bir birikim olduğunu söylemek gerekir. Nesnelere ait görüntülerin bilgisayarlar nezdinde anlamlı hale gelmesi bizlere oldukça kolaylık sağlayacaktır.

Beynimiz görüntüleri hızlı ve kolay bir şekilde idrak edebilirken bilgisayarlar için anlamlandırılması güç problemlerdir. Son yıllarda, bu güç problemleri çözümlemeye başarılı bir ilerleme gösterilmiştir. Özellikle, derin CNN mimarileri ile görsel tanımlama işlevlerinde yeterli seviyelerde başarımlar elde edilmiştir [35]. Bu nedenle CNN mimarileri en çok tercih edilen derin öğrenme tekniklerinden biridir ve bilgisayarlı görü çalışmalarında yaygın bir biçimde kullanılmaktadırlar [36].

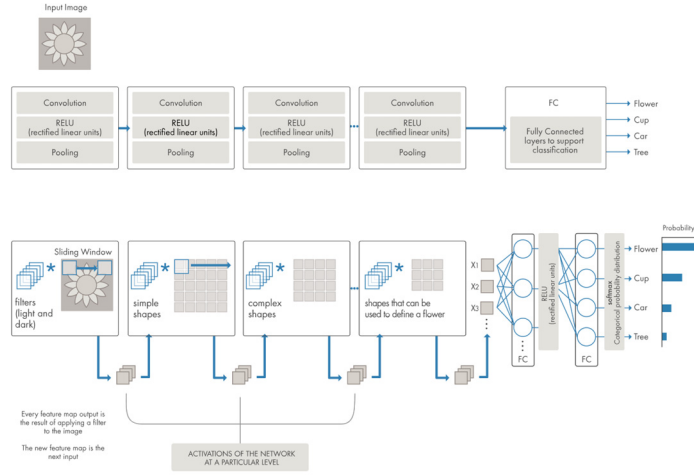
2.3. Evrişimli Sinir Ağları

CNN, YSA'larının çoğunlukla çok boyutlu ve büyük hacimli veriler için kullanılan özelleştirilmiş şeklidir. CNN'ler ile insan beyindeki görüntüyü işleme merkezinin (visual cortex) çalışma mekanizması betimlenmektedir. Şekil 3'te bu durum temsil edilmektedir [37, 38]. CNN çok sayıda ara katmana sahiptir. Her katman girdi olarak verilen görüntüden özellik çıkararak bir sonraki katmana iletir. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte bu tip ağlara duyulan ihtiyaç artmıştır. Bu nedenle, uygulamalara yönelik birçok farklı CNN mimarisi geliştirilmiştir.



a. **Şekil 3. a.) İnsan visual cortex yapısı, b.) Eşdeğer CNN benzerlik modeli**

CNN mimarisi, Şekil 3'te ifade edildiği gibi özellik öğrenme (feature learning) ve sınıflandırma (classification) kısımlarından oluşmaktadır [38]. Yapının işleyişine ilişkin bir illüstrasyon ise Şekil 4'te verilmektedir.

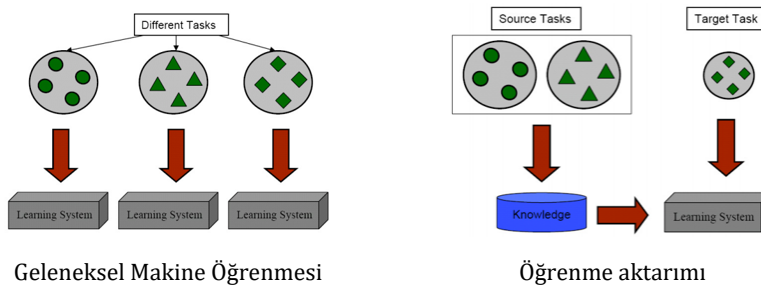


Şekil 4. CNN mimarisinin işleyişi

Giriş görüntüsü, özellik öğrenme kısmına uygulanır. Çıkarılan özellikler, sınıflandırma kısmına iletilir. Sınıflandırma katı görüntünün özellikleri kullanılarak çalışır ve bir çıkış üretir. Özellik öğrenme katı, peş peşe tekrarlayan evrişim ve havuzlama katman çiftlerinden oluşur. Evrişim katında evrişim işlemi ile görüntü filtrelenir. Bu katman çok sayıda sayısal filtrenin birleşiminden oluşmuş gibi düşünülebilir. Bu filtreler sayesinde, girdi verisinden özellik haritaları çıkarır. Havuzlama katı ise komşu pikselleri tek piksele birleştirir. Böylece görüntünün boyutları azalmış olur. Bu temel yapıya ek olarak aralarda düzleştirme, normalizasyon, seyreltme ve softmax gibi işlemler de uygulanmaktadır. Konvolüsyon ve havuzlama katmanlarından sonra sınıflandırma işleminin gerçekleştirilebilmesi için girdinin düzleştirme katmanı ile tek boyutlu vektör haline çevrilmesi gerekmektedir. Tam bağlantılı katmanın işlevi, önceki katmanın çıktısına (özellik haritasına) göre hangi özelliklerin belirli bir sınıfla en ilişkili olduğunu tespit etmektir. Bu katman hangi yüksek seviyeli özelliklerin belirli bir sınıfa daha güçlü bağlandığını ortaya çıkararak farklı sınıflar için uygun olasılıklar üretir. Seyreltme katmanı (dropout layer), derin sinir ağına aşırı öğrenme (ezberleme, overfitting) sorununu engellemek amacıyla kullanılır. Aşırı öğrenme, ağır eğitim verilerinde yüksek bir başarı sağlarken test verilerinde başarı gösterememesi anlamına gelir. Seyreltme katmanının görevi derin sinir ağının eğitimi sırasında gizli katmanlarda var olan bazı yapay nöronları etkisiz hale getirmektir [39]. Bu katmanın kullanıldığı derin öğrenme uygulamalarında başarımın çoğu zaman arttığı tespit edilmiştir.

2.4. Evrişimli Sinir Ağları ile Sınıflandırma

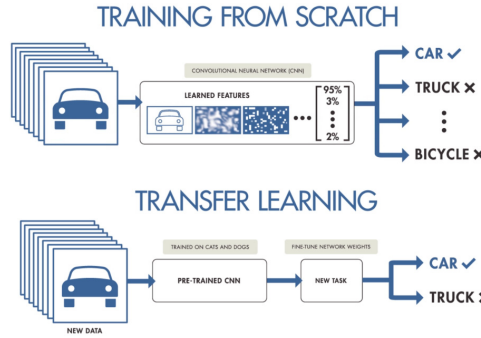
Bir CNN ağı tasarımında ağın en iyi şekilde eğitilmesi için yukarıda bahsedilen birçok katman kullanılmaktadır. Bu katmanlarla birlikte ağın eğitimi için girdi verisi olarak nitelikli ve hacimli veriye ihtiyaç duyulur. Bu durum büyük bir emek ve zaman gerektirir. Öğrenme aktarımlı ağın eğitilmesi esnasında kolaylık ve zaman tasarrufu sağlamaktadır. Şekil 5'te öğrenme aktarımı yaklaşımına ilişkin görsel verilmiştir.



Şekil 5. Geleneksel öğrenme ve öğrenme aktarımı temsilleri

Öğrenme aktarımı, makine öğrenmesi yöntemlerinin de tıpkı insanlarda olduğu gibi bir problemi çözerken elde ettiği bilgiyi özümseyip, başka bir problem ile karşılaştığında edinilen bilgiyi kullanmasını temel almaktadır. Öğrenme aktarımı ile önceki bilgiler kullanılarak daha az eğitim verisi ile daha yüksek başarı gösteren ve daha hızlı

öğrenen modeller elde edilebilmektedir. Makine öğrenmesi ve öğrenme aktarımı yöntemlerinin çalışma prensiplerini birlikte ifade eden bir illüstrasyon Şekil 6'da verilmektedir.



Şekil 6. Makine öğrenmesi ve öğrenme aktarımı yöntemleri prensip çalışma biçimleri

Öğrenme aktarımı yöntemi, girdi verileri ile önceden eğitilmiş olan ağıın yeni tasarlanan CNN üzerine uyumlandırılması işlemidir [40]. Buradaki amaç, gerekli iş gücünü indirgemek ve zamandan tasarruf ederek önceden eğitilen ağıın model performansının geliştirilmesidir. Günümüzde farklı zorluklardaki karmaşık problemlerin çözümü için öğrenme aktarımı yöntemi büyük ölçüde tercih edilmektedir. Öğrenme aktarımı sayesinde daha önce öğrenilen bilgiler yeni model için yol gösterici olmakta, böylece daha kısa sürede daha başarılı modeller elde edilebilmektedir.

3. Bulgular

3.1. Veri Seti

Bu çalışmada geliştirilen CNN'lerin eğitim, doğrulama ve test işlemleri için CRACK500, CFD, Cracktree200, GAPS384 ve AEL olmak üzere 5 farklı veri seti kullanılmıştır. Bu veri setlerine ilişkin bilgiler aşağıda verilmiştir.

CRACK500: Cep telefonları kullanılarak Temple Üniversitesi ana kampüsünde elde edilmiş 2000×1500 piksel boyutundaki 500 görüntüyü içeren bir yüzey çatlak veri setidir. Bu veri seti CRACK500 olarak adlandırılmıştır. Her çatlak görüntüsü, piksel düzeyinde açıklamalı bir ikili haritaya sahiptir. Bu veri kümesi şu anda piksel bazında açıklama içeren, kamuya açık en büyük yüzey çatlak veri kümesidir [8]. Veri seti 250 eğitim verisi görüntüsüne, 50 doğrulama verisi görüntüsüne ve 200 test verisi görüntüsüne bölünmüştür. Sınırlı sayıda görüntü, görüntülerin büyük boyutluluğu ve kısıtlı hesaplama kaynağı nedeniyle, her görüntü örtüşmeyen 16 alt görüntü bölgesine kırılmış ve yalnızca 1.000 pikselden fazla çatlak içeren bölgeler muhafaza edilmiştir. Böylelikle eğitim verisi 1.896 görüntüden, doğrulama verisi 348 görüntüden, test verisi 1124 görüntüden oluşur hale getirilmiştir.

CFD: Shi ve diğerleri [41], The Crack Forest Dataset (CFD) adı verilen açıklamalı bir yol çatlak veri seti önermiştir. Veri seti, 480×320 piksel boyutunda 118 görüntüden oluşmaktadır. Her görüntü elle etiketlenmiş çatlak konturlarına sahiptir. Görüntüleri almak için kullanılan cihaz, 4 mm odaklı, f/2.4 diyafram açıklığına ve 1/135s pozlama süresine sahip bir iPhone5 akıllı telefondur.

Cracktree200: Zou ve diğerleri [42], önerdikleri yöntemi değerlendirmek için bu veri setini geliştirmişlerdir. Veri seti, çeşitli çatlak türlerine sahip 800×600 boyutunda 206 yüzey görüntüsü içermektedir. Bu nedenle bu veri seti Cracktree200 olarak adlandırılmıştır. Veri kümesi, gölgeler, tıkanıklıklar, düşük kontrast, gürültü vb. gibi zorlukları içermektedir.

GAPs384: Alman Asfalt Kaplama Problemi (GAPs) veri seti, büyük ölçekli standartlaştırılmış yüksek kaliteli bir veri setidir. GAPS veri seti, çatlaklar, çukurlar, işlemeli yamalar vb. gibi çeşitli sınıflarda toplam 1.969 gri değerli görüntü içermektedir. Görüntü çözünürlüğü 1920×1080 pikseldir. Görüntülerdeki hasar, sınırlayıcı bir kutuyla çevrelenmiştir. Bu tür bir açıklama, piksel bazında bir çatlak tahmin görevi için derin modeli eğitmek için yeterince iyi değildir. Bu sorunu çözmek için, GAPS veri setinden sadece çatlak sınıfını içeren 384 görüntü manuel olarak seçilerek piksel bazında açıklama yapılmıştır. Piksel bazında açıklama içeren yeni crack veri seti GAPs384 olarak adlandırılmıştır ve CRACK500 üzerinde eğitilen modelin genelleme kabiliyetini test etmek için kullanılmıştır. Görüntünün büyük boyutu ve GPU'nun sınırlı belleği nedeniyle, her görüntü 640×540 piksel boyutunda örtüşmeyen 6 görüntü bölgesine kırılmıştır. Yalnızca 1000'den fazla piksele sahip görüntü bölgeleri muhafaza edilmiştir. Böylece test için 509 görüntü elde edilmiş durumdadır [8, 43].

AEL: Aigle-RN, [44]'de, piksel seviyesi açıklamaları ile 38 görüntü içeren bir veri seti olarak önerilmiştir. Veri seti, Fransız kaplama yüzeyinin durumunu periyodik olarak izlemek için trafikte elde edilmiştir. ESAR adı verilen veri

seti, kontrollü aydınlatma olmadan statik bir toplama sistemi ile elde edilmiştir. ESAR, 15 adet tam açıklamalı crack görüntüsüne sahiptir. LCMS adı verilen veri seti 5 piksel düzeyinde açıklamalı çatlak görüntüsü içermektedir. Üç veri seti az sayıda görüntüye sahip olduğundan, model değerlendirmesi için AEL adlı bir veri kümesinde birleştirilmiştir.

Bu çalışmada yukarıda bahsedilen CRACK500, CFD, cracktree200, GAPs384 ve AEL veri setlerinden elde edilen ve 10000 adet (5000 adet çatlak içermeyen, 5000 adet çatlak içeren) görüntü bulunduran yeni bir veri seti oluşturulmuştur. Bu yeni veri setinin, %70'i eğitim, %15'i doğrulama ve %15'i test verisi olarak kullanılmıştır. Çalışmadaki benzetimler Matlab ortamında gerçekleştirilmiştir.

3.2. Yüzey Çatlak Tespiti İçin Geliştirilen Modeller

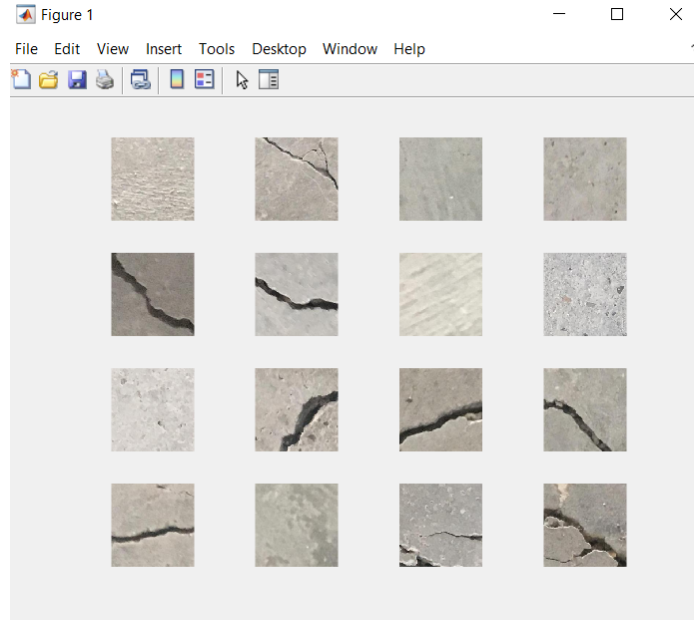
Bu çalışmada, uçuşa elverişlilik için pist yüzeyi çatlak tespiti yaklaşımı için iki farklı model ile MATLAB üzerinde çalışılmıştır. İlk model için sıfırdan CNN eğitimi gerçekleştirilmiş ve sınıflandırma yapılmıştır. İkinci modelde ise önceden eğitilmiş bir CNN modeli olan AlexNet mimarisi probleme uygun olarak öğrenme aktarımı yoluyla probleme uyarlanmış ve sınıflandırma gerçekleştirilmiştir.

Takip eden bölümlerde, sırasıyla geliştirilen modellerin tasarımı, bu modellerin eğitim / test aşamaları ve başarı oranları sunulmuştur.

3.2.1 Sıfırdan CNN Tasarımı ile Sınıflandırma

Uçuşa elverişlilik için pist yüzeyi çatlak tespitinde ilk geliştirilen model CNN'in sıfırdan eğitilmesiyle elde edilmiştir. Bu amaçla katedilen adımlar sırasıyla şu şekildedir: 1. Görüntü verilerini yükleme ve alt veri setlerinin belirlenmesi, 2. Ağ mimarisinin tanımlanması, 3. Eğitim seçeneklerinin belirlenmesi, 4. Ağın eğitilmesi, 5. Test verilerinin etiketlerinin kestirimi ve sınıflandırma doğruluğunun hesaplanması. Çalışmada kullanılan 10000 etiketli veriden oluşan veri setinin %70'i (7500 resim) eğitim, %15'i (1500 resim) doğrulama ve kalan %15'i (1500 resim) test veri seti olarak ayrılmıştır. Veri setlerinin yüzde olarak ayrımı seed (tohum) değerine bağlı olarak rasgele bir biçimde gerçekleştirilmiştir.

Veri setinden rasgele seçilen bazı örnekler Şekil 7'de verilmiştir:

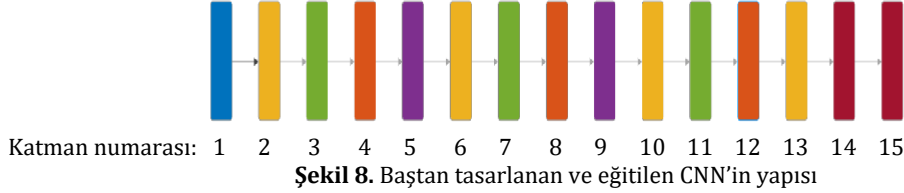


Şekil 7. Veri setindeki görüntülerden bazı örnekler

Çalışmada baştan tasarlanan ve eğitilen CNN'in yapısı aşağıdaki gibidir ve Şekil 8'deki gibi görselleştirilebilir:

1	Resim girdi katmanı	giriş boyutu 227×227×3 ve 'zerocenter' normalizasyonu
2	Evrişim	16 adet 3×3 evrişim, stride [1 1], veri doldurma 'same'
3	Toplu normalizasyon	
4	ReLU aktivasyon	
5	Max havuzlama	2×2 max havuzlama, stride [2 2], veri doldurma [0 0 0 0]

6	Evrşim	16 adet 3×3 evrşim, stride [1 1], veri doldurma 'same'
7	Toplu normalizasyon	
8	ReLU aktivasyon	
9	Max havuzlama	2×2 max havuzlama, stride [2 2], veri doldurma [0 0 0 0]
10	Evrşim	32 adet 3×3 evrşim, stride [1 1], veri doldurma 'same'
11	Toplu normalizasyon	
12	ReLU aktivasyon	
13	Tam bağlantılı katman	2'li tam bağlı katman
14	Softmax	
15	Sınıflandırma çıkışı	crossentropyex

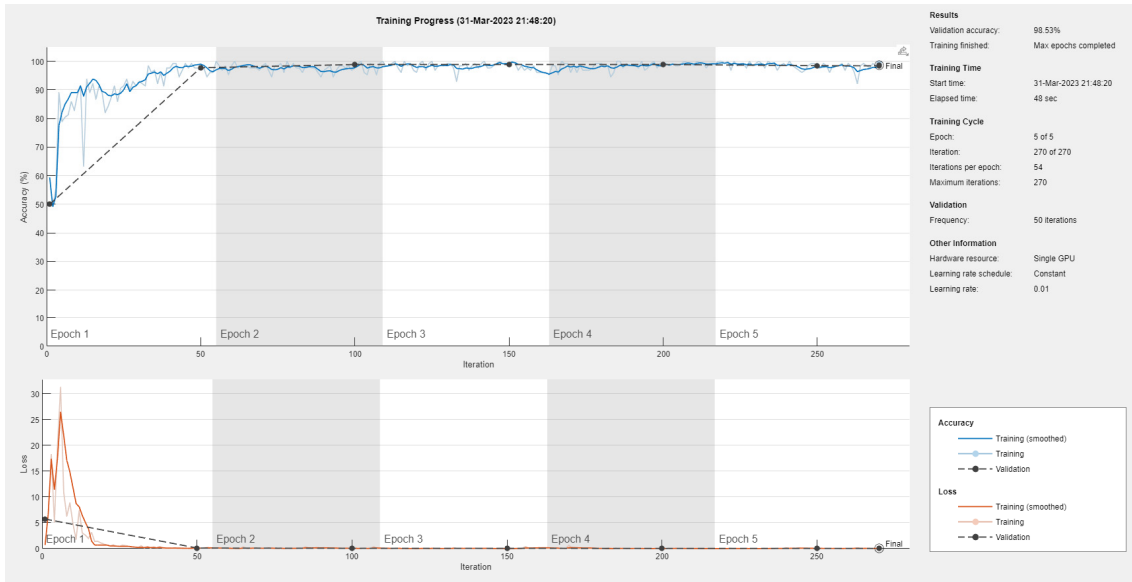


Şekil 8. Baştan tasarlanan ve eğitilen CNN'in yapısı

Şekil 8'de, mavi renk girdi katmanını, turuncu renk evrşim katmanını (ya da son kısımda tam bağlantılı katmanı), yeşil renk toplu normalizasyonu, bordo renk ReLU aktivasyonu, mor renk max havuzlamayı ve kırmızı renk softmax ve sınıflandırma çıkışını temsil etmektedir.

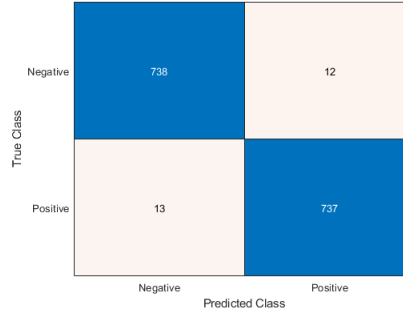
Ağın eğitimi 5 epok boyunca sürdürülmüştür. Doğrulama verileri ve doğrulama sıklığı belirtilerek eğitim sırasında ağ doğruluğu izlenmiştir. Her epokta veriler karıştırılmıştır. Ağ eğitim verileri kullanılarak eğitilmiş ve bu esnada düzenli aralıklarla doğrulama verileri ile ağın doğrulama başarımını doğrulama verileri kullanılarak hesaplanmıştır. Doğrulama verileri ağ ağırlıklarını güncellemek için kullanılmamıştır.

Şekil 9'da eğitim ilerleme grafiği mini batch kaybı ile doğruluğunu ve doğrulama kaybı ile doğrulama başarımını verilmektedir. Kayıp, çapraz entropi kaybıdır. Doğruluk, ağın doğru sınıflandırdığı görüntülerin yüzdesini gösterir. Çalışmada geliştirilen CNN için eğitim ve validasyon grafikleri yine Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. Ağın eğitim süreci ve ilgili grafikler

Eğitilmiş ağı kullanarak doğrulama verileri için doğrulama başarımını hesaplanmıştır. Doğruluk, ağın doğru tahmin ettiği etiketlerin oranını ifade etmektedir. Geliştirilen CNN, doğrulama veri seti için %98.53 oranında doğru öngörü üretmiştir. Yani üretilen etiketler %98.53 oranında gerçek etiketlerle eşleşmiştir. Test veri kümesine ait doğruluk oranı ise %98.33 olarak elde edilmiş olup, test hata matrisi diyagramı Şekil 10'da verilmiştir.



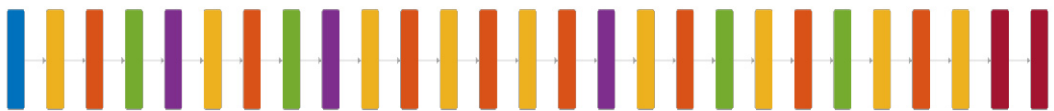
Şekil 10. Baştan geliştirilen ağın test verileri için sunduğu başarıma ait test hata matrisi

3.2.2 Önceden Eğitilmiş AlexNet Mimarisi ile Sınıflandırma

Öğrenme aktarımı, derin öğrenme uygulamalarında yaygın olarak kullanılır. Önceden hazırlanmış bir ağ yeni bir görev öğrenmek için kullanılabilir. Öğrenme aktarımı ile bir ağın ince ayarının yapılması, rasgele başlatılan ağırlıklara sahip bir ağın sıfırdan eğitilmesine göre genellikle daha hızlı ve sade bir süreçtir. Daha az sayıda eğitim görüntüsü kullanılarak öğrenilen özellikler hızlı bir şekilde yeni bir göreve aktarılabilir.

Çalışmada, önceden eğitilmiş bir AlexNet evrişimli sinir ağına ince ayar yapılarak ağın yeni bir görüntü koleksiyonu için sunacağı sınıflandırma başarımı de incelenmiştir. AlexNet, bir milyondan fazla görüntü üzerinde eğitilmiş derin bir model olup, görüntüleri 1000 nesne kategorisine sınıflandırabilmektedir. Ağa, çok çeşitli görüntüler için zengin özellik temsilleri öğretilmiştir. Çalışmada öğrenme aktarımı ile ince ayarı yapılan AlexNet yapısı aşağıdaki gibidir ve Şekil 11'deki gibi görselleştirilebilir:

1	Resim girdi katmanı	giriş boyutu $227 \times 227 \times 3$ ve 'zerocenter' normalizasyonu
2	Evrişim	96 adet $11 \times 11 \times 3$ evrişim, stride [4 4], veri doldurma [0 0 0 0]
3	ReLU aktivasyonu	
4	Çapraz kanal normalizasyonu	eleman başına 5 kanal ile kanallar arası normalleştirme
5	Max havuzlama	3×3 max havuzlama, stride [2 2], veri doldurma [0 0 0 0]
6	Gruplanmış evrişim	2 grup 128 adet $5 \times 5 \times 48$ evrişim, stride [1 1], veri doldurma [2 2 2 2]
7	ReLU aktivasyonu	
8	Çapraz kanal normalizasyonu	eleman başına 5 kanal ile kanallar arası normalleştirme
9	Max havuzlama	3×3 max havuzlama, stride [2 2], veri doldurma [0 0 0 0]
10	Evrişim	384 adet $3 \times 3 \times 256$ evrişim, stride [1 1], veri doldurma [1 1 1 1]
11	ReLU aktivasyonu	
12	Gruplanmış evrişim	2 grup 192 adet $3 \times 3 \times 192$ evrişim, stride [1 1], veri doldurma [1 1 1 1]
13	ReLU aktivasyonu	
14	Gruplanmış evrişim	2 grup 128 adet $3 \times 3 \times 192$ evrişim, stride [1 1] veri doldurma [1 1 1 1]
15	ReLU aktivasyonu	
16	Max havuzlama	3×3 max havuzlama, stride [2 2], veri doldurma [0 0 0 0]
17	Tam bağlantılı katman	4096'lı tam bağlı katman
18	ReLU aktivasyonu	
19	Dropout	%50 terk edilen bağlantı
20	Tam bağlantılı katman	4096'lı tam bağlı katman
21	ReLU aktivasyonu	
22	Dropout	%50 terk edilen bağlantı
23	Tam bağlantılı katman	64'lü tam bağlı katman
24	ReLU aktivasyonu	
25	Tam bağlantılı katman	2'li tam bağlı katman
26	Softmax	
27	Sınıflandırma çıkışı	crossentropyex



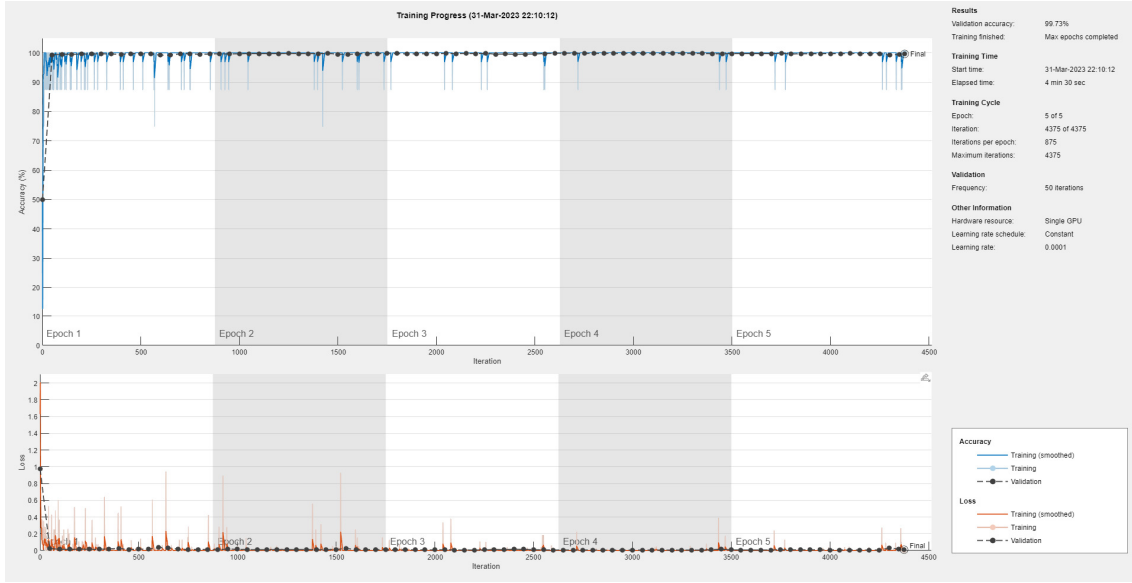
Katman numarası : 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27

Şekil 11. Öğrenme aktarımı tabanlı AlexNet CNN yapısı

Önceden eğitilmiş ağın son üç katmanı 1000 sınıf için yapılandırılmıştır. Çalışmada iki sınıf bulunduğu için orijinal son üç katman kaldırılmış yerine yeni 2'li çıkış barındıran üç katman yerleştirilmiştir. Son üç katman, tam bağlı bir katman, bir softmax katman ve bir sınıflandırma çıkışı ile değiştirilip önceden eğitilmiş ağdan alınan son 3 katman haricindeki katmanlar ile tümelştirilmiş ve yeni sınıflandırma görevi gerçekleştirilmiştir.

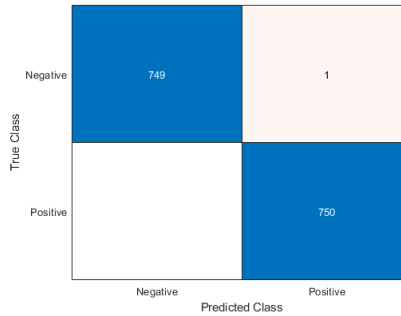
Ağın eğitimi 5 epok boyunca sürdürülmüştür. Her epokta veriler karıştırılmıştır. Ağ eğitim verileri kullanılarak eğitilmiş ve bu esnada düzenli aralıklarla doğrulama verileri ile ağın doğrulama başarımı doğrulama verileri kullanılarak hesaplanmıştır. Doğrulama verileri ağ ağırlıklarını güncellemek için kullanılmamıştır.

Şekil 12'de eğitim ilerleme grafiği mini batch kaybı ile doğruluğunu ve doğrulama kaybı ile doğrulama başarımını gösterir. Kayıp, çapraz entropi kaybıdır. Doğruluk, ağın doğru sınıflandırdığı görüntülerin yüzdesini gösterir. Çalışmada öğrenme aktarımı uygulanan AlexNet için eğitim ve validasyon grafikleri Şekil 12'de verilmiştir.



Şekil 12. AlexNet için eğitim süreci ve ilgili grafikler

Çalışmada ele alınan problem için uyarlanan AlexNet doğrulama veri seti için %99.73 oranında doğru öngörü üretmiştir. Yani üretilen etiketler %99.73 oranında gerçek etiketler ile eşleşmiştir. Test veri kümesine ait doğruluk oranı ise %99.93 olarak elde edilmiş olup, test hata matrisi diyagramı Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 13. Öğrenme aktarımı uygulanan AlexNet mimarisinin test verileri için sunduğu başarıma ait test hata matrisi

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, uçuşa elverişlilik için havalimanı pistinde yüzey çatlak tespiti için CNN mimarilerinin kullanımı incelenmiştir. Geliştirilen CNN mimarileri, sıfırdan tasarlanmış bir model ve ayrıca önceden eğitilmiş AlexNet modelidir. Pist üzerindeki zemin hasarı, kabarma veya kırık yüzeyler (çatlama, kırılma, kopma, açılma vb.) uçuş emniyetini tehdit etmektedir. Bunların kontrolü, görevi ile ilgili eğitimi almış personeller tarafından yapılır ancak zaman kaybına yol açar. Geliştirilen modeller ile tespit işlemlerine yönelik incelemeler hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilecektir.

Günümüzde görüntü sınıflandırma alanında, derin öğrenme modelleri diğer bütün yöntemlere göre daha başarılı sonuçlar vermektedir. Geliştirilen CNN modelleri, güvenli uçuş için pist yüzeyindeki çatlakları algılayabilecek

şekilde eğitilmiştir. Beş farklı veri setinden derlenen test verileri ile test edilen modeller yüksek başarı oranları sağlamıştır.

İlk geliştirilen modelde CNN sıfırdan eğitilerek sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. CNN ağ mimarisi en optimum düzeyde tasarlanmaya çalışılmıştır. Model 5000 çatlaklı, 5000 çatlaksız görüntü içeren bir veri seti kullanılarak eğitilmiştir. CNN'e ait en yüksek test doğruluk değeri %98,33 olarak elde edilmiştir. Bu uygulamada tasarlanan modelde kullanılan aktivasyon fonksiyonları, öğrenme hızı ve seyreltme değişkenleri gibi özelliklerin en uygun şekilde belirlenmesi gerekir. Bu değişkenlerin en doğru şekilde belirlenebilmesi için belli bir araştırma ve deneyim gerekmektedir.

İkinci geliştirilen modelde ise önceden eğitilmiş ve yaygın olarak kullanılan AlexNet mimarisi ile sınıflandırma yapılmıştır. AlexNet evrişimli sinir ağına eğitim yoluyla ince ayar yapılarak ağın yeni bir görüntü koleksiyonu ile başarılı bir sınıflandırma yapması sağlanmıştır. Model 5000 çatlaklı ve 5000 çatlaksız görüntüden oluşan aynı veri seti ile eğitilmiştir. Görüntü verileri AlexNet modeline uygun olacak şekilde boyutlandırılmıştır. Ağın son üç katmanı, tam bağlı bir katman, bir softmax katman ve bir sınıflandırma çıktı katmanıyla değiştirilip önceden eğitilmiş ağdan alınan katmanlar ile yeni katmanlar tümleştirildikten sonra sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Yeni katmanlarda aktarılan katmanlara göre daha hızlı öğrenme sağlamak için, tamamen bağlı katmanın ağırlık öğrenme oranı ve bias öğrenme oranı değerleri artırılmıştır. Aktarılan katmanlardaki öğrenmeyi yavaşlatmak için ilk öğrenme hızı küçük bir değere ayarlanmıştır. Yeni son katmanlardaki öğrenmeyi hızlandırmak için ise tam bağlı katmanın öğrenme oranı faktörleri artırılmıştır. Öğrenme hızı ayarlarının bu kombinasyonu sadece yeni katmanlarda hızlı öğrenmeyi ve diğer katmanlarda daha yavaş öğrenmeyi sağlamıştır. Geliştirilen modelin en yüksek test doğruluk değeri %99,93 olarak elde edilmiştir. Bu sonuç, Alexnet mimarisinin CNN tabanlı çatlak tespitine göre daha başarılı bir sonuç verdiğini göstermiştir.

Kaynakça

- [1] Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü. 2016. Havaalanı Pistleri, HAD/T-283-37.
- [2] Zhang, J., Qian, S., Tan, C., 2022. Automated Bridge Surface Crack Detection And Segmentation Using Computer Vision-Based Deep Learning Model, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 115(1-13).
- [3] Yazgan, E., Yılmaz, A.K., 2019. Prioritization of Factors Contributing to Human Error for Airworthiness Management Strategy with ANP. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 91(78-93).
- [4] Tatlı, A., 2016. Uçuşa Elverişliliğin Meteorolojik Açından İncelenmesi ve Kısa Vadeli Kestirim Modeli İçin Zaman Serilerinde Yapay Sinir Ağları Yaklaşımı: Hasan Polatkan Havaalanı Örneği. Anadolu Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.
- [5] Wang, H., vd., 2019. Civil Aviation Safety Evaluation Based on Deep Belief Network and Principal Component Analysis. *Elsevier Safety Science*, 112(90-95).
- [6] Inacio, F.R., vd., 2008. Object Detection and Identification Applied to Planes and Aircraft for Airport Surveillance, 2008 23rd International Conference Image and Vision Computing New Zealand.
- [7] Tsai, Y. vd., 2015. Innovative Crack Sealing Analysis and Cost Estimation for Airport Runway Shoulders Using 3D Laser Technology and Automatic Crack Detection Algorithms. *Airfield and Highway Pavements*, 652-661.
- [8] Yang, F., Zhang, L., Yu, S., 2019. Feature Pyramid and Hierarchical Boosting Network for Pavement Crack Detection. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 21(1525-1535).
- [9] Jiang, L., Xie, Y., Ren, T., 2020. Deep Neural Networks Approach for Pixel-Level Runway Pavement Crack Segmentation Using Drone-Captured Images, arXiv, 2001.03257.
- [10] Peng, L. vd., 2015. Research on Crack Detection Method of Airport Runway Based on Twice-Threshold Segmentation. 2015 Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control, 1716-1720.
- [11] Jo, J., Jadidi, Z., 2020. A High Precision Crack Classification System Using Multi-Layered Image Processing and Deep Belief Learning. *Structure And Infrastructure Engineering*, 16(297-305).
- [12] Gopalakrishnan, K. vd., 2017. Deep Convolutional Neural Networks with Transfer Learning For Computer Vision-Based Data-Driven Pavement Distress Detection. *Construction and Building Materials*, 157(322-330).
- [13] Qurishee, M.A. vd., 2020. Bridge Girder Crack Assessment Using Faster RCNN Inception V2 and Infrared Thermography. *Journal of Transportation Technologies*, 10(110-127).
- [14] Gopalakrishnan, K., 2018. Deep Learning in Data-Driven Pavement Image Analysis and Automated Distress Detection: A Review, *Data*, 3(28), 2-19.
- [15] Gopalakrishnan, K. vd., 2018. Crack Damage Detection in Unmanned Aerial Vehicle Images of Civil Infrastructure Using Pre-Trained Deep Learning Model. *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, 8(1-14).
- [16] Cha, Y.-J., Choi, W., Büyüköztürk, O., 2017. Deep Learning-Based Crack Damage Detection Using Convolutional Neural Networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 32(361-378).

- [17] Coca, Georgiana Lucia vd., 2020. Crack Detection System in AWS Cloud Using Convolutional Neural Networks. *Procedia Computer Science*, 176(400-409).
- [18] Ha, J., Park, K. ve Kim, M., 2021. A Development of Road Crack Detection System Using Deep Learning-based Segmentation and Object Detection. *The Journal of Society for e-Business Studies*, 26(93-106).
- [19] Yang, X., Li, H., Yu, Y., Luo, X., Huang, T. and Yang, X., 2018. Automatic Pixel-Level Crack Detection and Measurement Using Fully Convolutional Network, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 33(12), 1090-1109.
- [20] Ni, F. and Zhang, J., 2018. Pixel-Level Crack Delineation in Images with Convolutional Feature Fusion, *Structural Control and Health Monitoring*, e2286, 26(1-18).
- [21] Ronneberger, O., Fischer, P. and Brox, T., 2015. U-net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation, *International Conference on Medical image computing and computer-assisted intervention*, 234-241.
- [22] Cha, Y.J., Choi, W., Büyüköztürk, O., 2017. Deep Learning-Based Crack Damage Detection Using Convolutional Neural Networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 5(361-378).
- [23] Zhang, L., Yang, F., Daniel Zhang, Y., Zhu, Y.J., 2016. Road Crack Detection Using Deep Convolutional Neural Network, 2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 3708-3712.
- [24] Maeda, H., Sekimoto, Y., Seto, T., Kashiya, T., Omata, H., 2018. Road Damage Detection Using Deep Neural Networks with Images Captured Through a Smartphone, arXiv preprint, arXiv:1801.09454
- [25] Makantasis, K., Protopapadakis, E., Doulamis, A., Doulamis, N., Loupos, C., 2015. Deep Convolutional Neural Networks for Efficient Vision Based Tunnel Inspection, *Proceedings-2015 IEEE 11th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing, ICCP 2015*, 335-342.
- [26] Stentoumis, C., Protopapadakis, E., Doulamis, A. and Doulamis, N., 2016. A Holistic Approach for Inspection of Civil Infrastructures Based on Computer Vision Techniques, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences- ISPRS Archives*, 131-138.
- [27] Sevinç, A., Özyurt, F., 2022. Beton Yüzey Çatlaklarının Tespitinde Derin Öğrenme Mimarilerin Kullanılması, *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 6(318-325).
- [28] McCulloch, W.S., Pitts, W. 1943. A Logical Calculus of The Ideas Immanent in Nervous Activity. *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5(115-133).
- [29] Yakıt, O., Özkan, Y., 2017. Kurumsal Kaynak Planlama Sistemlerinde Yapay Sinir Ağlarının Değerlendirilmesi Yaklaşımı. *Siyaset, Ekonomi ve Yönetim Araştırmaları Dergisi*, 5(287-296).
- [30] Karpathy, A., Stanford University CS231n Convolutional Neural Networks for Visual Recognition Course Notes, 2019, (<http://cs231n.github.io/>), (Ağustos 2022)
- [31] Bengio, Y., 2009. Learning deep architectures for AI. *Foundations and Trends in Machine Learning*, 2(1-127).
- [32] Deng, L., Yu, D. 2013. Deep Learning: Methods and Applications. *Found. Trends Signal Process.* 7(197-387).
- [33] LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G., 2015. Deep Learning. *Nature*. 521(436-444).
- [34] Brownlee, J., 2019, What is Deep Learning?, (<https://machinelearningmastery.com/what-is-deep-learning/>), (Mayıs 2022)
- [35] Akmeşe, Ö.F., Erbay, H., Kör, H., 2018. Derin Öğrenme ile Görüntü Kümeleme. 5th International Management Information Systems Conference, 108-110.
- [36] Ferentinos, K.P. 2018. Deep Learning Models for Plant Disease Detection and Diagnosis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 145(311-318).
- [37] N. Kruger vd., 2013. Deep Hierarchies in the Primate Visual Cortex: What Can We Learn for Computer Vision?, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 35(1847-1871).
- [38] Introducing Deep Learning with MATLAB, <https://www.mathworks.com/campaigns/offers/next/deep-learning-ebook.html>, (Erişim Tarihi: Ağustos 2022).
- [39] Brownlee, J., A Gentle Introduction to Dropout for Regularizing Deep Neural Networks, 2018, (<https://machinelearningmastery.com/dropout-for-regularizing-deep-neural-networks/>) (Erişim Tarihi: Ağustos 2022)
- [40] Geetharamani, G., Arun Pandian, J., 2019. Identification of Plant Leaf Disease Using A Nine Layer Deep Convolutional Neural Network. *Computers and Electrical Engineering*, 76(323-338).
- [41] Shi, Y., Cui, L., Qi, Z., Meng, F. and Chen, Z., 2016. Automatic Road Crack Detection Using Random Structured Forests. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(3434-3445).
- [42] Zou, Q., Cao, Y., Li, Q., Mao, Q. and Wang, S., 2012. Cracktree: Automatic Crack Detection from Pavement Images. *Pattern Recognition Letters*, 33(227-238).
- [43] Eisenbach, M., Stricker, R., Seichter, D., Amende, K., Debes, K., Sesselmann, M., Ebersbach, D., Stoeckert, U., Gross, H.-M., 2017. How to Get Pavement Distress Detection Ready for Deep Learning? A Systematic Approach, *International Joint Conference on Neural Networks*, 2039-2047.
- [44] Amhaz, R., Chambon, S., Idier, J. and Baltazart, V., 2016. Automatic Crack Detection on Two-Dimensional Pavement Images: An Algorithm Based on Minimal Path Selection, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(2718-2729).

Çelik Tel ve Cam Elyaf Ağları ile Takviye Edilmiş Tabakalı Beton Kompozitlerin Eğilme Dayanımı

Metehan ARDAHANLI^{*1}, Türkyay KOTAN²

*¹ Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ERZURUM
² Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ERZURUM

(Alınış / Received: 21.02.2023, Kabul / Accepted: 12.07.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 31.08.2023)

Anahtar Kelimeler

Çelik Lif,
Cam Elyaf,
Kompozit,
Eğilme Dayanımı

Öz: Lifli betonlar; sahip oldukları yüksek eğilme dayanımı ve içeriğinde kullanılan liflerin yüksek çekme dayanımı sayesinde çeşitli endüstriyel uygulamalarda, fabrika zeminlerinde, benzin istasyonlarında, prefabrik beton uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu çalışmada, aynı işlenebilirliğe sahip olan rastgele yönlendirilmiş cam ve çelik lifli betonlar ile tabakalı çelik tel ve cam elyaf ağları içeren beton kompozitlerin eğilme dayanımları incelenmiştir. Hacimce %0.5, %1 ve %1.5 oranlarında lif kullanılarak rastgele yönlendirilmiş cam ve çelik lifli beton grupları oluşturulmuştur. Çelik tel veya cam elyaf ağları içeren tabakalı beton kompozitler, rastgele yönlendirilmiş cam veya çelik lifli betonların lif hacmine eşdeğer olması için 3, 5 ve 7 tabakalı olarak üretilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde; tabakalı lifli beton kompozitlerin eğilme dayanımlarının, aynı işlenebilirliğe sahip rastgele yönlendirilmiş lifli betonların eğilme dayanımlarından lif türü fark etmeksizin daha yüksek olduğu belirlenmiş olup tabakalı lifli beton kompozitlerin üretiminde yüksek eğilme dayanımı ve uygun işlenebilirlik için herhangi bir kimyasal katkı kullanımının gerekmediği tespit edilmiştir. Ayrıca tabakalı çelik telli beton kompozitlerin eğilme dayanımlarının, tabakalı cam elyafli beton kompozitlerin eğilme dayanımlarından daha yüksek olduğu ve tabaka sayısının çelik telli beton kompozitlerde eğilme dayanımı sonuçlarını daha fazla etkilediği belirlenmiştir.

Flexural Strength of Layered Concrete Composites Reinforced with Steel Wire and Glass Fiber Meshes

Keywords

Steel Fiber,
Glass Fiber,
Composite,
Flexural Strength

Abstract: Fiber concrete is widely preferred in various industrial applications, factory pavements, gas stations, and prefabricated concrete applications thanks to the high flexural strength and high tensile strength of the fibers used in its content. In this study, the flexural strengths of randomly oriented glass and steel fiber concretes with the same workability and concrete composites containing layered steel wire and glass fiber mesh were investigated. By using 0.5%, 1% and 1.5% fiber by volume, randomly oriented glass and steel fiber concrete groups were formed. Laminated concrete composites containing steel wire or glass fiber meshes are produced with 3, 5 and 7 layers to be equivalent to the fiber volume of randomly oriented glass or steel fiber concretes. When the results are examined; It has been determined that the flexural strength of laminated fiber concrete composites is higher than the flexural strength of randomly oriented fiber concrete with the same workability, regardless of fiber type, and it has been determined that no chemical additives are required in the production of laminated fiber concrete composites for high flexural strength and suitable workability. In addition, it has been determined that the flexural strength of the laminated steel wire concrete composites is higher than the flexural strength of the laminated glass fiber concrete composites and the number of layers affects the flexural strength results in more in the steel wire concrete composites.

*İlgili Yazar, email: metehan.ardahanli@erzurum.edu.tr

1. Giriş

Beton; agrega, çimento, su temel bileşenlerinden oluşan ve inşaat endüstrisinde en yaygın kullanılan yapı malzemesidir. Betonun birçok yapı malzemesine göre sahip olduğu avantajlar, günümüze kadar kullanımının artarak devam etmesini sağlamıştır [1]. Dünya nüfusunun artması ve teknolojinin gelişmesi ile birlikte insanoğlunun ihtiyacına uygun yapıların inşa edilmesi gerekliliği ön plana çıkmış ve bu ihtiyaç beton endüstrisinde özel betonlar kavramını ortaya çıkarmıştır. Başlıca özel beton çeşitleri; ağır veya hafif betonlar, püskürtme betonlar ve reaktif pudra betonları iken bir başka özel beton çeşidi olan lifli betonlar da bu sınıfta yer almaktadır.

Lifli betonlar, betonun çeşitli özelliklerini iyileştirmek için karışıma değişik teknik ve oranda liflerin katılması ile elde edilen özel betonlardır. Beton karışımlarında başlıca; cam, çelik, polimer ve karbon lifler kullanılmaktadır. Lifler, betonun hem taze haldeki hem de sertleşmiş durumdaki özelliklerini doğrudan etkileyebilmektedir [2-3].

Lifler, kullanıldıkları betonun basınç dayanımına etkisinin az olmasına karşı [4-7] sahip oldukları yüksek çekme dayanımı sayesinde betonun eğilme etkisi altındaki davranışında daha önemli yer tutar. Beton karışımlarına lifler çoğunlukla rastgele yönelmiş olarak katılmakta ve betonda oluşturduğu etki incelenmektedir. Rastgele yönelmiş olarak katılan cam ve çelik lifin betonda oluşturduğu etkilere ait literatür incelenirse;

Cam elyaflarının 5 - 10 kg/m³ ağırlığında kullanılması ile üretilen numunelerde çekme dayanımının kontrol betonuna göre daha yüksek olarak elde edildiği belirlenmiştir [8]. Hacimce %0.25, %0.5, %0.75 ve %1 oranlarında cam elyafı kullanımı ile elde edilen beton numunelerinde en yüksek eğilme dayanımı % 0.5 cam elyafı oranında [9] ve bir başka çalışmada ise hacimce %0.6, %0.8 ve %1 oranlarında cam elyafı kullanılmış en yüksek eğilme dayanımı %1 oranında elde edilmiştir [10].

Çelik liflerin hacimce %0-%3 arasında kullanılması ile kiriş beton numuneler üretilmiş ve çelik liflerin beton eğilme dayanımını artırdığı [11], en yüksek dayanımın ise %1.5 oranında elde edildiği belirlenmiştir [12]. Çelik liflerin betonda kullanıldığı oranlarının artışı ile işlenebilirliğin düştüğü tespit edilmiştir [13].

Çelik lif ile üretilen betona 0.5, 0.75, 1.0, 1.25 kg/m³ ağırlıklarında cam elyafı katılarak, betonun basınç ve çekme dayanımındaki değişimleri incelenmiştir. Cam elyaflarının, betonun basınç ve çekme dayanımına olumlu yönde etki sağladığı [14], hacimce %0.5, %0.75, %1 oranlarında çelik ve cam elyafı betonlar üretilmiş olup çelik lifli betonların eğilme dayanımlarının cam elyafı betonlara göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir [15].

Literatür incelendiğinde, betonda rastgele yönelmiş cam ve çelik liflerin etkilerini inceleyen birçok çalışma olduğu, ancak bu liflerin betonda tabakalı şekilde kullanıldığı herhangi bir çalışma olmadığı görülmektedir. Bu çalışmada, çelik tel ve cam elyafı kullanılarak tabakalı beton kompozit malzeme üretilmiştir. Taze beton işlenebilirliği sabit tutularak üretilen rastgele yönelmiş ve tabakalı lifli betonların eğilme dayanımları karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Çalışmada Aşkale Çimento fabrikasından temin edilen CEM II/A-M(P-LL) 42.5R tipi çimento kullanılmış olup çimentoya ait kimyasal özellikler Tablo 1'de, fiziksel ve mekanik özellikler ise Tablo 2'de verilmiştir. Rastgele yönelmiş ve tabakalı lifli betonların üretiminde bazalt agregası 0-2, 2-4, 4-8 ve 8-16 mm olacak şekilde 4 farklı elek çap aralığında kullanılmıştır. Bazalt agregasına ait fiziksel özellikler Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 1. Çimentonun Kimyasal Özellikleri

Kimyasal Özellikler	Değer (%)
SiO ₂	17.60
Al ₂ O ₃	4.45
Fe ₂ O ₃	3.08
CaO	60.02
MgO	2.29
SO ₃	2.67
Na ₂ O	0.22
K ₂ O	0.63
Cl	0.01
Kızdırma Kaybı	0.49
Ölçülemeyen	0.54
Toplam	100
Serbest CaO	0.69

Tablo 2. Çimentonun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Fiziksel ve Mekanik Özellikler	Değer
İncelik (45µm Elek Üstü %)	6.01
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3.01
Özgül Yüzey (cm ² gr)	4403
Priz Başı (saat-dakika)	2s-36dk
Priz Sonu (saat-dakika)	3s-24dk
Hacim Genişlemesi (mm)	0.5
Su İhtiyacı (%)	29.8
Basınç Dayanımı (MPa) 2. gün	27.46
Basınç Dayanımı (MPa) 28. gün	51.03

Tablo 3. Bazalt Agregasının Fiziksel Özellikleri

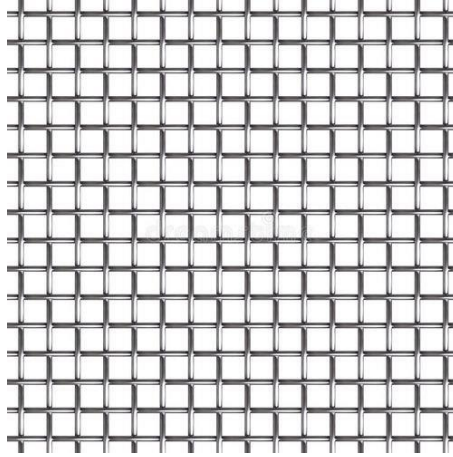
Agrega Boyutu (mm)	Doygun Kuru Yüzey Tane Yoğunluğu (gr/cm³)	Su Emme (%)	Yüzey Nemi (%)
0-2	2.61	2.98	2.59
2-4	2.61	2.95	2.39
4-8	2.63	1.40	1.49
8-16	2.63	1.47	1.17

Rastgele yönlenmiş lifli beton karışımlarında cam elyafı, E tipi cam elyafı olup uzunlukları 20-24 mm arasında ve özgül ağırlığı ise 2.48 gr/cm³'dür. 7.48 gr/cm³ özgül ağırlığa sahip çelik liflerin mekanik ve karakteristik özellikleri ise Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Çelik liflerin Karakteristik Özellikleri

Mekanik ve Karakteristik Özellikler	Değer
Nominal Çekme Dayanımı (MPa)	1800
Elastisite Modülü (MPa)	200000
Maksimum Birim Şekil Değiştirme (%)	0.8
Tel Grubu	4D
Uzunluk (mm)	61
Çap (mm)	0.75
Boy/Çap Oranı	80

Tabakalı lifli beton üretiminde 4 mm kare açıklığa sahip çelik tel (Şekil 1) ve alkali şartlandırma sonrası mukavemet kaybı maksimum %50, alkali şartlandırma sonrası çekme mukavemeti ≥ 20 N/mm olan Fawori Optimix marka 4 mm kare açıklığa sahip donatı filesi (cam elyaf) (Şekil 2) kullanılmıştır.



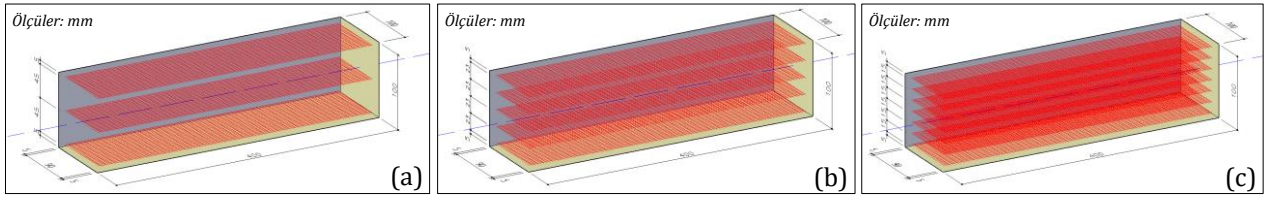
Şekil 1. Çelik tel



Şekil 2. Cam elyaf donatı filesi

2.2. Metot

Rastgele yönlenmiş olarak kullanılan cam ve çelik lifleri hacimce %0.5, %1 ve %1.5 oranlarında betona eklenmiştir. Tabakalı lif içeren betonlardaki lif hacmi ise rastgele yönlenmiş lifli betonlardaki lif hacmine yaklaşık eşit olacak şekilde 3, 5 ve 7 tabakalı (Şekil 3) üretilmiştir. Tabakalı lif içeren betonlarda en üst ve en alt liflerin beton yüzeyi ile yükseklik mesafesi 5 mm değerinde eşit tutulmuştur. 7 tabakalı lifli kompozitlerde tabakalar arası yükseklik mesafesi 15 mm, 5 tabakalı lifli kompozitlerde tabakalar arası yükseklik mesafesi 22.5 mm ve 3 tabakalı lifli kompozitlerde tabakalar arası yükseklik mesafesi ise 45 mm alınmıştır. Her bir tabakalı lifli kompozit gruplarından 3'er adet 100×100×400 mm boyutlu kiriş numuneler üretilerek eğilme deneyi uygulanmıştır



Şekil 3. Kompozit numunelerde lif tabakalarının yerleşimi ve boyutları [(a) 3 lif tabakalı kompozit, (b) 5 lif tabakalı kompozit, (c) 7 lif tabakalı kompozit]

2.2.1. Eğilme dayanımı

Tek noktalı eğilme deneyi (Şekil 4), 100×100×400 mm boyutlu kiriş numunelere TS EN 12390-5 [17] standardına uygun ve yükleme hızı 0.05 MPa/sn olacak şekilde uygulanmıştır.



Şekil 4. Tek noktalı eğilme deneyi

2.2.2. Beton karışım grupları

Lifli betonların üretiminde taze beton slump çökme değeri 8 ± 1 cm'de sabit tutulmuş olup herhangi bir kimyasal katkı kullanılmamıştır. Beton karışım hesabı TS 802 [16] standardına uygun olarak yapılmıştır. Beton gruplarına ait karışım miktarları Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Beton Karışım Grupları

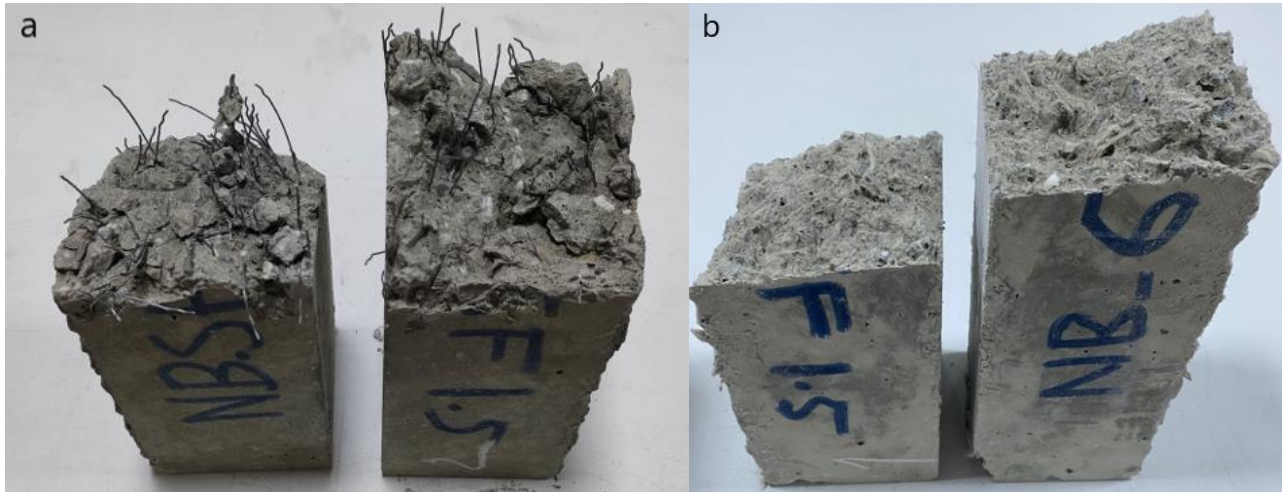
Gruplar	Malzeme Miktarı (kg/m ³)							Slump (cm)		
	Çimento	Agrega (mm)				Su Miktarı	Lif Hacmi (%)		Lif Miktarı	
		0-2	2-4	4-8	8-16					
K	491	441	213	307	567	240	-	-	8±1	
Rastgele Yönlendirilmiş Lifli Beton Grupları	CE0.5	491	441	213	307	567	Değişken	0.5	0.161	8±1
	CE1.0	491	441	213	307	567	Değişken	1.0	0.322	8±1
	CE1.5	491	441	213	307	567	Değişken	1.5	0.482	8±1
	ÇLK0.5	491	441	213	307	567	Değişken	0.5	0.471	8±1
	ÇLK1.0	491	441	213	307	567	Değişken	1.0	0.942	8±1
	ÇLK1.5	491	441	213	307	567	Değişken	1.5	1.413	8±1
Tabakalı Lifli Beton Kompozit Grupları	CE3T	491	441	213	307	567	240	≅0.5	≅0.161	8±1
	CE5T	491	441	213	307	567	240	≅1.0	≅0.322	8±1
	CE7T	491	441	213	307	567	240	≅1.5	≅0.482	8±1
	ÇLK3T	491	441	213	307	567	240	≅0.5	≅0.471	8±1
	ÇLK5T	491	441	213	307	567	240	≅1.0	≅0.942	8±1
	ÇLK7T	491	441	213	307	567	240	≅1.5	≅1.413	8±1

K: Kontrol Grubu, CE: Cam Elyafı Grup, ÇLK: Çelik Lifli Grup, 3T: 3 Tabakalı, 5T: 5 Tabakalı, 7T: 7 Tabakalı

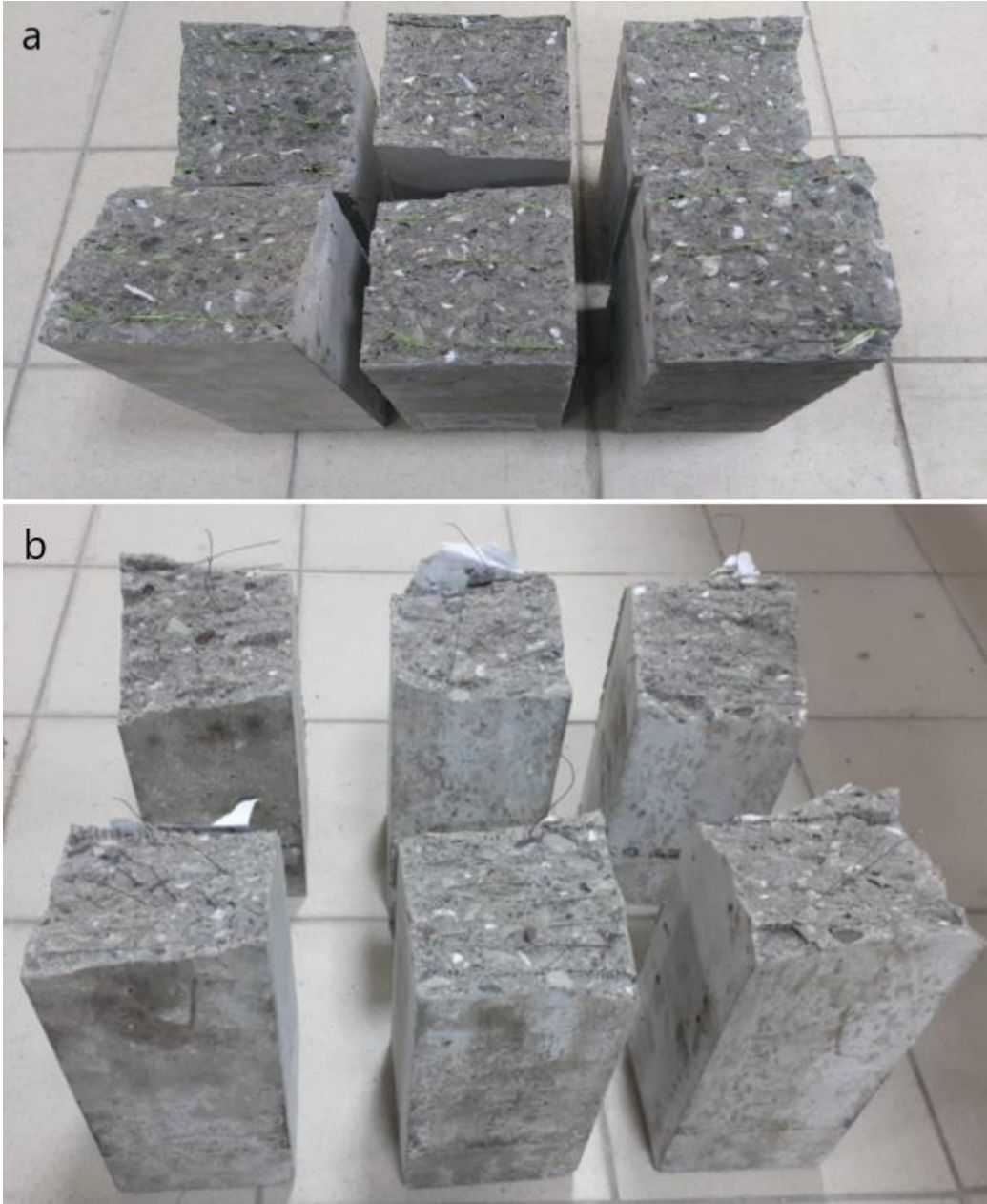
3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Eğilme dayanımı sonuçları

Eğilme deneyi uygulanan rastgele yönlendirilmiş lifli betonlara ve tabakalı lifli kompozitlere ait fotoğraflar Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde, rastgele yönlendirilmiş lifli betonlarda lif dağılımının tam homojen olmadığı fakat aynı taze beton işlenebilirliğe sahip olan tabakalı lifli kompozitlerde ise daha homojen bir görüntü oluştuğu görülmektedir.

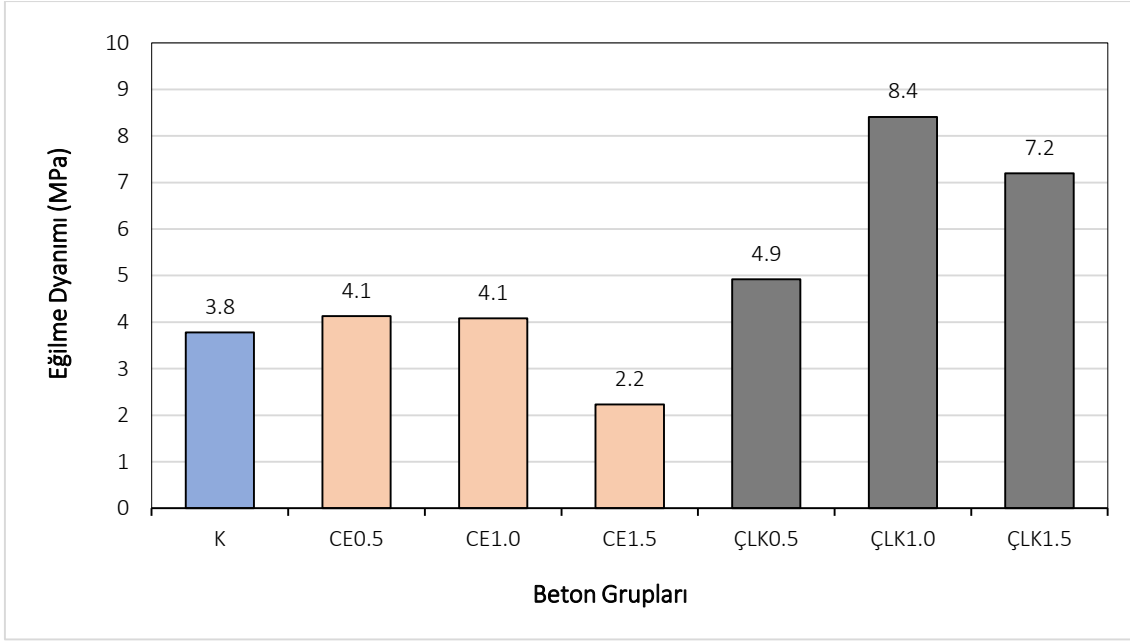


Şekil 5. Rastgele yönlendirilmiş lifli betonlar (Çelik lif-ÇLK1.5 (a), Cam elyafı-CE1.5 (b))



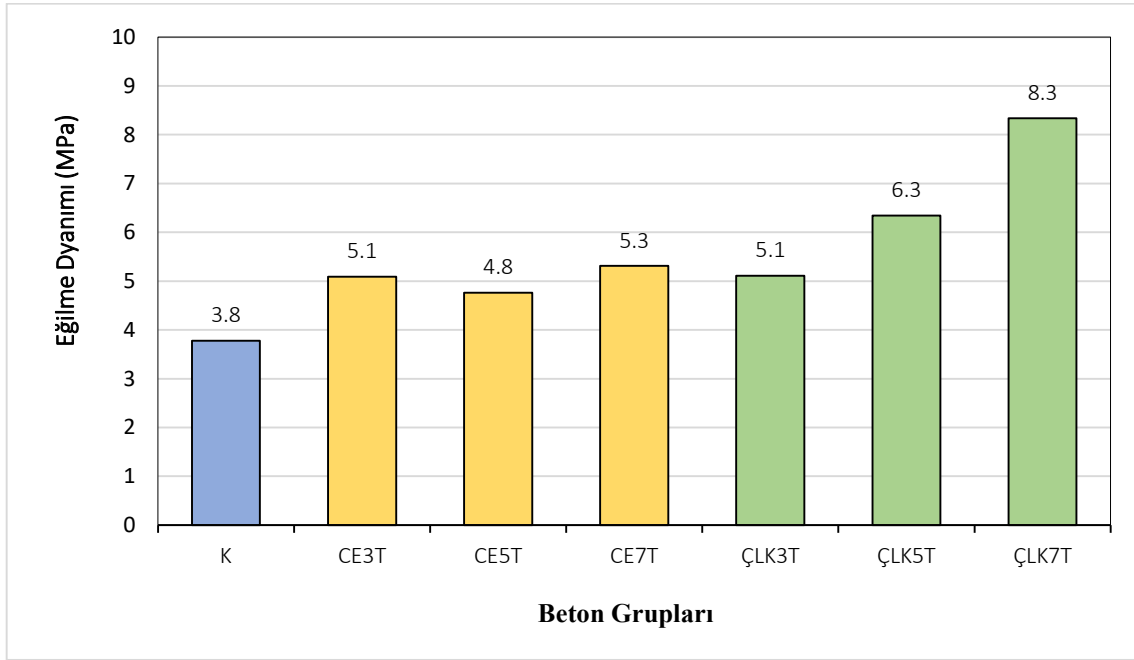
Şekil 6. Tabakalı lifli kompozitler (Cam elyafı-CE3T (a), Çelik tel-ÇLK7T (b))

Kontrol ve rastgele yönlendirilmiş beton numunelerine ait eğilme deneyi sonuçları Şekil 7’de verilmiştir. Şekil 7 incelendiğinde, rastgele yönlendirilmiş şekilde betona katılan lifli gruplar içerisinde sadece CE1.5 grubunun eğilme dayanımı kontrol betonunun eğilme dayanımından düşük olduğu görülmektedir. Çelik lifli betonların eğilme dayanımı sonuçları, cam elyaflı betonların eğilme dayanımı sonuçlarından daha yüksek olduğu belirlenmiş olup en yüksek eğilme dayanımı ÇLK1.0 beton grubunda elde edilmiştir. Aynı işlenebilirlikte üretilen hacimce %0.5 ve %1.0 oranlarında rastgele yönlendirilmiş olarak cam elyafı içeren betonların eğilme dayanımları arasında ciddi bir fark olmadığı tespit edilmiştir.



Şekil 7. Kontrol ve rastgele yönlenmiş lifli beton grupları

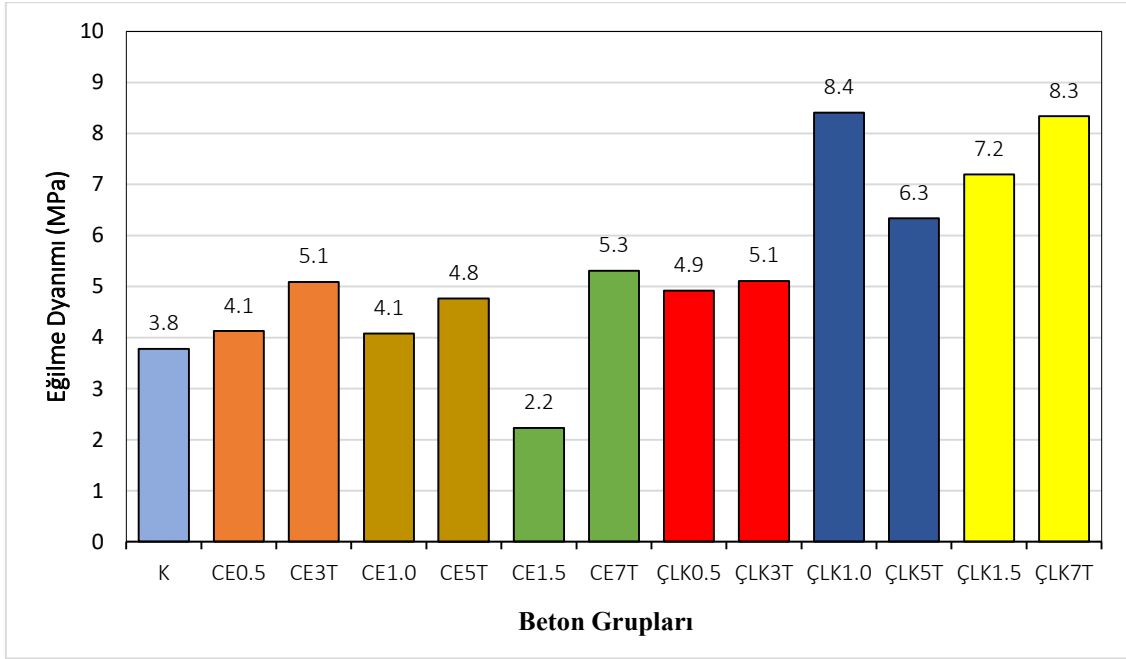
Kontrol ve tabakalı lifli beton numunelerine ait eğilme deneyi sonuçları Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 8 incelendiğinde, tüm tabakalı lifli beton gruplarının eğilme dayanımları kontrol betonunun eğilme dayanımından daha yüksek olduğu görülmektedir. Tabakalı cam elyafı içeren betonlarda tabaka sayısının eğilme dayanımında önemli bir değişikliğe sebep olmadığı, tabakalı çelik tel içeren betonlarda tabaka sayısı arttıkça eğilme dayanımının arttığı ve en yüksek eğilme dayanımının ise ÇLK7T grubunda (kontrol betonuna göre %121 oranında daha yüksek) olduğu belirlenmiştir.



Şekil 8. Kontrol ve tabakalı lifli beton grupları

Şekil 9'da yönlenmiş lifli betonların ve tabakalı lifli betonların eğilme dayanımı sonuçları birlikte verilmiştir. Şekilde lif hacimleri yaklaşık eşit olan gruplar aynı renk ile gösterilmiştir. ÇLK1.0-ÇLK5T beton grubu hariç tüm tabakalı lifli beton gruplarının eğilme dayanımı sonuçları yaklaşık eş değer hacme sahip rastgele yönlenmiş lifli beton gruplarının eğilme dayanımı sonuçlarından fazladır. Herhangi bir kimyasal katkı kullanılmadan aynı taze beton işlenebilirliğine sahip tabakalı lifli üretimin eğilme dayanımını, cam elyafı donatı filesi kullanımında minimum %26 maksimum %41, çelik tel kullanımında ise minimum %35 maksimum %121 oranında artırdığı belirlenmiştir. Su/Çimento oranı sabit tutularak gerçekleştirilen lifli beton üretimlerinde lif hacminin artışına bağlı olarak taze beton işlenebilirliğinin azaldığı [18-20] bilinmektedir.

Üretilen herhangi bir betonun dayanım ve dayanıklılık özellikleri açısından yeterli işlenebilirliğe sahip olması oldukça önemlidir. Rastgele yönlenmiş lifli betonlarda sabit işlenebilirliği sağlayabilmek için karışımın su miktarı artmış ve bu durum yeterli işlenebilirliğe sahip olan lifli betonda dayanım kaybına sebep olmuştur. Tabakalı lifli kompozit beton karışımlarında yeterli işlenebilirlik için karışım suyu artırılmasına veya herhangi bir kimyasal katkı kullanılmasına ihtiyaç duyulmaksızın üretim yapılabileceği belirlenmiştir. Tabakalı lifli beton kompozitlerin lif sürekliliği açısından daha homojen bir yapı (Şekil 5 ve Şekil 6) sağladığı görülmüştür. Öte yandan, lif hacminin yaklaşık %0.5 oranına eşit olduğu tabakalı cam elyafı CE3T beton grubunun eğilme dayanımı, lif hacminin %1.5 olduğu CE1.5 grubundan daha yüksektir. Bu durum, tabakalı cam elyafı beton kompozitlerin düşük hacimde bile olsa yeterli dayanıma ulaşabileceğini ve böylece kullanılacağı yapıya gelecek yüklerin azalabileceğini göstermektedir.



Şekil 9. Rastgele yönlenmiş ve tabakalı lifli beton grupları

4. Sonuçlar

Bu çalışmada kontrol betonuna ek olarak rastgele yönlenmiş lifli betonlar ve tabakalı lifli betonlardan oluşan toplam 13 farklı beton grubu üretilmiştir. Üretilen bu beton gruplarında işlenebilirlik aynı değerde (eşit slump değeri) tutulmuş ve numunelere eğilme deneyi uygulanmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar özetlenirse;

- ✓ Tabakalı lifli beton kompozitlerin eğilme dayanımlarının, aynı işlenebilirliğe sahip rastgele yönlenmiş lifli betonların eğilme dayanımlarından lif türü fark etmeksizin büyük oranda daha yüksek olduğu görülmüştür.
- ✓ Tabakalı lifli beton kompozitlerin üretiminde yüksek eğilme dayanımı ve uygun işlenebilirlik için herhangi bir kimyasal katkı kullanımının gerekmediği belirlenmiştir.
- ✓ Tabakalı lifli beton kompozitlerin lif sürekliliği açısından daha homojen bir yapı sağladığı gözlemlenmiştir.
- ✓ Tabakalı çelik telli beton kompozitlerin eğilme dayanımlarının, tabakalı cam elyafı beton kompozitlerin eğilme dayanımlarından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ Yaklaşık lif hacmi %0.5'e eşit 3 tabakalı olarak üretilen cam elyafı kompozit betonun eğilme dayanımının, %1.5 oranında rastgele yönlenmiş lif içeren betonun eğilme dayanımından daha yüksek olduğu belirlenmiştir.
- ✓ Tabakalı cam elyafı beton kompozitlerde tabaka sayısının eğilme dayanımında ciddi oranda bir değişikliğe sebep olmadığı belirlenirken, tabakalı çelik telli beton kompozitlerde ise tabaka sayısı ile eğilme dayanımı arasında doğru orantılı bir artış olduğu görülmüştür.

Kaynakça

- [1] Zhu, Y., Zhang, Y., Hussein, H. H., Chen, G. 2020. Flexural strengthening of reinforced concrete beams or slabs using ultra-high performance concrete (UHPC): A state of the art review. Engineering Structures, 205(2020).

- [2] Bayasi, Z., Soroushian, P. 1992. Effect of steel fiber reinforcement on fresh mix properties of concrete. Technical Paper ACI Materials Journal, 89(1992).
- [3] Jorna, M. C., Flores, M. N., Serna, P. 2023. Influence of short-term operating temperatures on compression and flexural behaviour of Macro Synthetic and Steel Fibre Reinforced Concretes. Journal of Building Engineering, 67(2023).
- [4] Li, S. X., Tang, L., Shi, W.Y., Zhong, C.C. 2020. Experimental investigation on hydro abrasive erosion of steel fiber UHPC and rubber UHPC. Adv. Mater. Sci. Eng., 6(2020), 1-10.
- [5] Chu, H.Y., Yu, Z., Wang, F.J., Feng, T.T., Wang, L.G. 2020. Effect of graphene oxide on mechanical properties and durability of ultra-high-performance concrete prepared from recycled sand. Nanomaterials, 10(2020), 1-17.
- [6] Kim, J.J., Yoo, D.Y. 2019. Effects of fiber shape and distance on the pullout behavior of steel fibers embedded in ultra-high-performance concrete. Cement and Concrete Composites, 103(2019), 213-223.
- [7] Chen, X., Wan, D.W., Jin, L.Z., Qian, K., Fu, F. 2019. Experimental studies and microstructure analysis for ultra high-performance reactive powder concrete. Construction and Building Materials, 229(2019).
- [8] Yıldız, S., Bölükbaş, Y., Keleştemur, O. 2010. Cam elyaf katkısının betonun basınç ve çekme dayanımı üzerindeki etkisi. Politeknik Dergisi, 13(2010), 239-243.
- [9] Ali, B., Qureshi, L. A. 2019. Influence of glass fibers on mechanical and durability performance of concrete with recycled aggregates. Construction and Building Materials, 228(2019).
- [10] Lv, Y., Cheng, H. M., Ma, Z. G. 2012. Fatigue performances of glass fiber reinforced concrete in flexure. Procedia Engineering, 31(2012), 551-556.
- [11] Namdar, A., Zakaria, I.B., Hazeli, A.B., Azimi, S.J., Razak, A.S.B.A., Gopalakrishna, G.S. 2013. An experimental study on flexural strength enhancement of concrete using small steel fibers. Frattura ed Integrita' strutturale, 26(2013), 22-30.
- [12] Pajak, M., Ponikiewski, T. 2017. Experimental investigation on hybrid steel fibers reinforced self-compacting concrete under flexure. Procedia Engineering, 193(2017), 218-225.
- [13] Mohammad, S. A., Krishna, T. N. C., Saketh, T., Ganesh, C. Y., Sathyan, D. 2022. Fresh and hardened state properties of waste tire fiber and steel fiber reinforced concrete. Materials Today: Proceedings, in press.
- [14] Yaprak, H., Şimşek, O., Öneş, A. 2004. Cam ve Çelik Liflerin Bazı Beton Özelliklerine Etkisi. Politeknik Dergisi, 7(2004), 353-358.
- [15] Kumar, Y. N., Kumar, B. D., Swami, B. L. P. 2022. Mechanical properties of geopolymer concrete reinforced with steel and glass fibers with various mineral admixtures. Materials Today: Proceedings, 52(2022), 632-641.
- [16] TS 802. 2016. Beton karışım tasarımı hesap esasları. Türk Standartları Enstitüsü, (2016), Türkiye.
- [17] TS EN 12390-5. 2019. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, (2019), Türkiye.
- [18] Yıldız, S., Keleştemur, M. H. 2000. Cam lif katkısının beton dayanımına etkisi. Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12(2000), 373-381.
- [19] Orhan, M. 2018. Çelik liflerin beton ve donatı arasındaki aderansa etkisi. KTO Karatay Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 68s, Konya.
- [20] Topçu, İ. B., Boğa, A. R. 2005. Uçucu kül ve çelik liflerin beton ve beton borularda kullanımı. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 18(2005).

Investigation and Comparison of Process Parameters for Advanced High Strength Steels for Next-Generation Vehicles

Ebru Barut^{*1,2}, Aysegul Akdogan Eker¹, M. Emre Kaymak²

^{*1}Institute of Science and Technology, Mechanical Engineering, Yıldız Technical University, Istanbul
²Research and Development Center, Toyotetsu Automotive Parts Industry and Trade Inc., Kocaeli

(Alınış / Received: 14.03.2023, Kabul / Accepted: 20.06.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 31.08.2023)

Keywords

Austenitizing temperature,
Soaking time,
22MnB5,
Mechanical properties,
Microstructure.

Abstract: Innovations are now required in the automotive industry, as well as in many other industries, due to environmental concerns and initiatives to minimize greenhouse gas emissions. The use of lightweight materials has grown for this purpose and specifically created new generation high-strength steels have begun to be used. In this work, the hot stamping method was used to examine the impact of process variables on the mechanical characteristics and microstructures of materials from two different steel manufacturers. The outcomes of varying the soaking time and austenitizing temperature were examined in order to analyze the process conditions. The analyses led to the selection of 890°C as the ideal austenitizing temperature and 240s as the ideal soaking time in the furnace. It was found that as the soaking time in the furnace decreased, it improved the microstructure and indirectly the mechanical characteristics. At 890° 240s parameters, the tensile strength of MAT1 material increased by 14.52% compared to MAT2 material. MAT1 material showed a high tensile strength of 1.34% for 240s at the same temperature at different times. This study has the feature of guiding the determination of the optimum parameters for the materials of different manufacturers starting from the manufacturing stage and then in the material selection stage.

Yeni Nesil Araçlar İçin Gelişmiş Yüksek Mukavemetli Çeliklerin Proses Parametrelerinin İncelenmesi ve Karşılaştırılması

Anahtar Kelimeler

Östenitleşme Sıcaklığı,
Bekletme Süresi,
22MnB5,
Mekanik Özellikler,
Mikroyapı.

Öz: Çevresel kaygılar ve sera gazı emisyonlarını en aza indirmeye yönelik girişimler nedeniyle artık birçok sektörde olduğu gibi otomotiv endüstrisinde de yeniliklere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla hafif malzemelerin kullanımı artmış ve özel olarak oluşturulan yeni nesil yüksek dayanımlı çelikler kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada, iki farklı çelik üreticisinden alınan malzemelerin mekanik özellikleri ve mikro yapıları üzerindeki proseste kullanılan parametrelerin etkisini incelemek için sıcak şekillendirme yöntemi kullanılmıştır. Proses koşullarını analiz etmek için bekletme süresi ve östenitleşme sıcaklığının değiştirilmesinin sonuçları incelenmiştir. Analizler sonucunda ideal östenitleşme sıcaklığı olarak 890°C ve ideal fırın bekletme süresi olarak 240 s seçilmiştir. Fırında bekletme süresinin azalmasının mikroyapıyı ve dolaylı olarak mekanik özellikleri iyileştirdiği gözlenmiştir. 890° 240s parametrelerinde MAT1 malzeme çekme mukavemeti MAT2 malzemeye göre %14,52 artmıştır. Aynı sıcaklıkta farklı sürelerde MAT1 malzemesi 240s için %1,34 yüksek çekme mukavemeti göstermiştir. Bu çalışma, farklı üreticilere ait malzemeler için imalat aşamasından başlayarak malzeme seçimi aşamasında optimum parametrelerin belirlenmesinde yol gösterici niteliktedir.

*Corresponding Author, email: barutebru@gmail.com

1. Introduction

Environmental regulations, fuel economy standards and expectations for high performance standards are all growing for the automotive industry [1]. Researchers are looking for ways to employ clean energy and lower gas emissions due to factors including rising costs of gasoline globally and environmental damage brought on by fuel consumption. The usage of lightweight materials in the automobile industry is seen as an environmentally sound, widely used method of lowering gas emissions [2].

Part design, method and material are recognized as the major issues that guide the literature and R&D research in the automotive industry. The fundamental needs in this area are the utilization of modern production processes, material selection, and structural optimization, which includes size, form, and topology optimization. It is expected that the energy absorbing capabilities of the parts will be good in accordance with the safety standards in order to ensure passenger and occupant safety, even though lightness is an important criterion in the design, material selection, and manufacturing phase of the components to be used in the automotive. To verify their level of safety and energy absorption, crash tests are performed [3, 4].

According to both simulation activities and real-world research, high strength steels, aluminum and magnesium alloys and composite materials have recently been selected for weight reduction in part lightening studies [3]. The best category to choose from when selecting materials is advanced high strength steels (AHSS), which exhibit high strength values as well as their elongation qualities [5]. As structural and safety elements, the AHSS steel group is utilized in the vehicle chassis and body parts such as the A-pillar, center pillar (B-pillar), in-door safety bars, bumper, roof, and seat arches. When compared to mild steels, AHSS offers about 50% more lightness. With the use of 40–50% of the most sophisticated high strength steels, gas emissions are reduced by 5% [6].

The most popular process for creating modern, high-strength steels is hot stamping. The processes of hot forming, cooling, and phase transformation make up the hot stamping process. Due to the martensite microstructure of the finished product, 22MnB5 is the most desired steel in the automobile industry due to its excellent mechanical qualities, weldability, and cost factors. The yield and tensile strengths of the press-hardening steel group 22MnB5 can, respectively, reach 1000 MPa and 1500 MPa levels after stamping. It is feasible to differentiate the material's microstructure and its physical, chemical, and mechanical properties by altering the hot stamping process parameters [7–10]. By adjusting the process settings, certain papers in the literature analyze the mechanical and microstructural features.

Using 22MnB5 steel, Chang, Z. et al. heated the steels to 900°C to complete the austenite phase transition. Once austenitization was complete, the steels were chilled under various cooling conditions, including water, oil, and pressure. Additional heat treatment included tensile and V-notch impact tests, as well as an examination of the microstructures of the steels that had been heated to 170 °C for 20 minutes. The temperature at which martensite crystallizes, or M_s , was lowered by nano-sized ϵ -carbide formation while the values for ductility and toughness rose by 0.36% [11].

The microstructures created under various air cooling and quenching circumstances were evaluated by Mandal, G. et al., and the mechanisms that improve the strength in the internal structure were investigated, in order to examine the structure-property relationship for 2 GPa microalloyed ultra-high strength materials. Dislocations and carbide/ carbonitride precipitates have been shown to produce strength-increasing processes in microstructure. The ensuing bainite and martensite structures were studied, and under various conditions, the steel's elongation values improved to values of 8–9% with a strength of 1841–1928 MPa. The steel originally had a strength of approximately 1991–2032 MPa with an elongation of 5–7% [12].

In order to optimize the process parameters during hot forming, the 22MnB5 material used in automotive components was shaped and subjected to a quenching procedure in the study by Aqida, S. The samples were heated to 950°C to generate austenite. The study's control parameters, including cooling water temperature, press (holding) time, and water flow rate, were established. The obtained samples were evaluated mechanically by taking tensile and hardness measurements, as well as metallurgically under an optical microscope. The study's findings indicated that shortening the chilling period was the best option, and as a result, the yield and shrinkage values—which raised the hardness value—were determined to be 1546 and 1923 MPa, respectively [13].

The variation in the microstructural features and mechanical properties of hot-formed 22MnB5 steels under various heating settings was investigated by Cavusoglu, O., et al. Within the parameters of the investigation, air cooling, quenching, and quenching+ tempering operations were applied to the steel samples heated in the furnace at 700°C, 800°C, and 900°C. Tensile testing and hardness measurements were used to understand their mechanical characteristics while an optical microscope was used to examine their microstructures. The finest mechanical

qualities were obtained by cooling in water at a temperature just around 800 °C. Additionally, it was found that the tempering procedure, which was followed by water chilling, marginally raised the overall elongation value, with elongation values ranging from 2 to 4 percent [14].

The impact of austenitization parameters on the mechanical characteristics and microstructure of Al-Si coated PHS (press hardening steel) steels was examined by Golem, L., et al. in their study. The austenitization temperature and soaking time effects on the 22MnB5 material were explored in the study. The primary austenite grains were found to be more evenly dispersed as the waiting period and furnace temperature increased, and the diffusion between the substrate material and coating layer also grew. By using tensile, double notch, and bending tests, mechanical properties were examined. The mechanical properties were adversely impacted by the development of primary austenite grains, and a decline in the toughness value was noted [15].

The impact of heating and cooling process parameters on the microstructure and mechanical characteristics of 22MnB5 steels was studied by Jiakai, S. By analyzing the structure of high-strength steels used in automotive, the study aims to investigate the characteristics of customized (various strength levels on the same part) and its impact on vehicle weight reduction. The temperature value after heating in the furnace was lowered to 720°C for this reason. Tensile strengths were thus measured starting at 1500 MPa and decreasing to 570 MPa values. The study found that various temperature and cooling rates led to the development of sections on the center pillar of the vehicles that had varying strengths and hardness. This effect was produced on the same part by adjusting the process parameters rather than connecting various sections together by welding [16].

The phase transition effect on 22MnB5 high strength steel suited for hot forming was investigated by Venturato, G., et al. under various process conditions. In order to create the martensite phase, the sheet materials were heated to the austenitization temperature, formed in the die, and then chilled at the slowest possible rate which is about 27°C/s. The continuous cooling transformation curves, heated at 850°C, 900°C, and 950°C, were examined for this purpose. These curves led to the conclusion that the cooling rate and quenching in the die altered the flow stress dependent on the rate of the bainite transition and that 550°C was a key temperature for the phase change [17]. General analyses of the research in the literature have revealed that they are designed around structure-property relationships.

In this study; different austenitization conditions were chosen, specifically for 22MnB5 steel, which is most frequently used in hot forming, and changes in mechanical properties and microstructure were seen with the modification of process parameters. No study comparing the materials of various steel manufacturers for the same steel material has been found in the literature, and this study aims to fill that gap. In the current article, the materials from the same steel group from two different steel manufacturers were chosen in order to examine the microstructure and mechanical qualities produced as a result of various production circumstances.

2. Material and Method

2.1. Materials

Steels from two different steel manufacturers were used in the experimental experiments called MAT1 and MAT2. Company information has been kept confidential for ethical and commercial reasons. Table 1 displays the materials' chemical make-up as employed in the experimental tests. Only the manufacturers and production processes of the two steels utilized change; both are members of the new generation advanced high-strength steel family, also known as 22MnB5. The impact of this discrepancy on mechanical characteristics and microstructure was examined in the experimental study.

Table 1. Chemical Compositions of Steels

Steel Type	C%	%Mn	%Si	%Ti	%P	%S
MAT 1	0,183	1,280	0,184	0,039	0,009	0,002
MAT 2	0,275	1,310	0,225	0,031	0,011	0,002

2.2. Hot Stamping Process

The hot stamping method is a forming method in which the internal structure of the material changes greatly depending on the process conditions. Figure 1 is a schematic illustration of the hot stamping method employed in experimental research. To obtain the austenite microstructure, the steel sample is placed into an industrial furnace and heated around the A3 curve while taking into account the time-temperature-transformation diagram of pure iron.

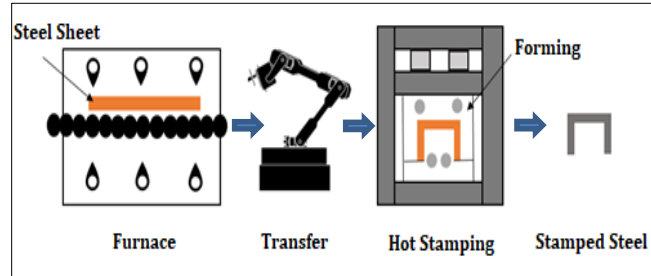


Figure 1. Schematic of Hot Stamping Process

To analyze the final microstructure of the austenitizing temperature, three different austenitizing temperatures—870, 890, and 910 °C—were chosen for this investigation. Three alternative periods, 240, 480, and 720 seconds, were chosen to study the impact of the steel sample's soaking time in the furnace on the final microstructure. The rate of cooling is 30 °C/min. The steel samples were heated to various temperatures up to the austenite transformation area, as shown in Figure 2, then cooled by holding them in the furnace for various lengths of time. The material was plastically deformed up to the martensite starting temperature (M_s) in the microstructure during the cooling process, which took the form of cooling in water. After 8 seconds, the samples were taken out of the die and allowed to cool in the air until the temperature (M_f) at which the martensite transition was complete. The collected samples were set up for the tests to be performed in accordance with the test requirements.

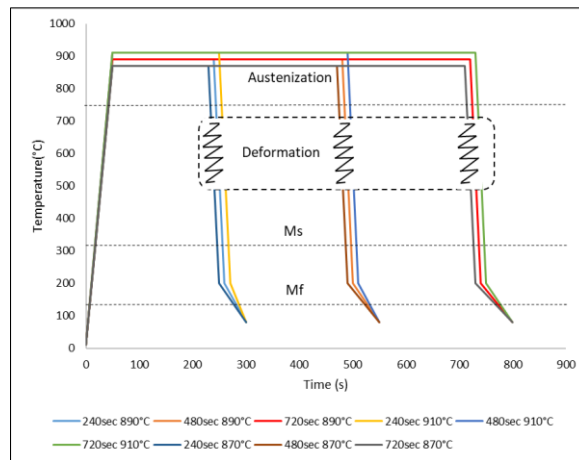


Figure 2. Thermal Cycle of Experimental Hot Stamped Steels

2.3. Test Methods and Sample Preparation

The steel sheet material that is produced by the hot stamping technique has the following measurements: 988x225x1.4 mm. By using the laser technology to cut the steel sheet material in line with the necessary criteria, test samples were created.

2.3.1. Tensile Test

According to TS EN ISO 6892-1 test standards, uni-axial tensile tests on test samples were conducted [18]. As seen in item a) in Figure 3, the test samples were made by cutting at 0°, 45°, and 90° in accordance with the rolling direction. They were then examined as described in item b). The test was conducted using an Instron floor-type biaxial extensometer tensile-compression tester with a 250kN capacity.



Figure 3. Tensile Test a) Samples b) Real Conditions Test

2.3.2. Hardness Measurements

According to TS EN ISO 6507-1 regulations, the test samples' hardness was evaluated using a Mitutoyo HV-100 A type Vickers hardness measurement apparatus [21].

2.3.3. Hole Expansion Ratio

In plastically deformed parts, areas with cut edges and fractured regions may vary depending on the sheet material's ductility and formability characteristics. High-strength automobile steels that have recently been created make these distinctions even more obvious. It is an experimental metal forming process simulation known as the "Hole Expansion (HE) - hole expansion" experiment that compares the production of cracks that take place during shaping of cut edges. The test is conducted using the guidelines established in the ISO 16330-2009 and TSG2309G standards [19, 20]. As shown in Figure 4, a conical punch is used to widen the hole that was drilled in the centre of the 10x10 mm² square-cut samples until a crack forms that travels along the section. A measure of formability is the rise in the percent expansion ratio in the hole diameters produced as a result of this application.

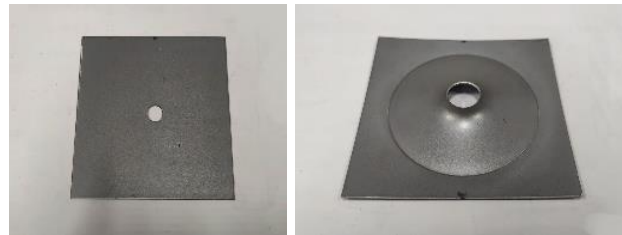


Figure 4. Hole Expansion Ratio a) Sample Before Test b) Sample After Test

2.3.4. Microstructure Analyses

On a Phenom XL model instrument of the Phenom-World brand, SEM analyses of the test samples were carried out. The test samples were initially mounted in bakelite and subjected to surface grinding before SEM examination. The prepared surfaces were made ready for imaging by polishing and etching procedures, respectively.

$$Ac3 = 910 - 203C - 15.2Ni + 44.7Si + 104V + 31.5Mo + 13.1W - (30Mn + 11Cr + 20Cu - 700P - 400Al - 120As - 400Ti) \quad (1)$$

$$Ac1 = 723 - 10.7Mn - 6.9Ni + 29.1Si + 16.9Cr + 290As + 6.38W \quad (2)$$

3. Results

The Ac1 temperatures for the MAT1 and MAT2 samples utilized in the experiment are 718.52°C and 717.67°C, respectively, based on the formulas mentioned above formula (1) and (2). Ac3 is 879.66 and 857.62 degrees Celsius, respectively. In Tables 1 and 2, it is shown how heating the materials to temperatures around and above the Ac3 temperature alters their tensile strength, yield strength, unit deformation, and hardness properties.

Table 2. Experimental Samples Conditions and Test Results of MAT1

Conditions	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HV)
240sec, 870°C	1801,56	1312,71	4,33	489,9
480sec, 870°C	1804,06	1320,36	4,3	502,1
720sec, 870°C	1781,67	1222,82	4,39	459,4
240sec, 890°C	1831,3	1283,68	4,29	504,1
480sec, 890°C	1825,91	1278,29	4,34	492,0
720sec, 890°C	1807,06	1268,04	4,34	550,1
240sec, 910°C	1813,55	1216,88	4,38	502,0
480sec, 910°C	1811,32	1296,04	4,37	507,8
720sec, 910°C	1809,55	1283,74	4,41	471,1

Table 3. Experimental Samples Conditions and Test Results of MAT2

Conditions	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HV)
240sec, 870°C	1583,23	1157,24	4,37	490,7
480sec, 870°C	1559,36	1108,49	4,32	472,5
720sec, 870°C	1535,71	1094,01	4,34	520,2
240sec, 890°C	1598,98	1138,96	4,33	482,7
480sec, 890°C	1568,17	1063,44	4,34	488,2
720sec, 890°C	1577,98	1097,36	4,33	544,2
240sec, 910°C	1510,84	965,43	4,37	482,4
480sec, 910°C	1508,58	1058,30	4,29	498,9
720sec, 910°C	1563,89	1151,59	4,33	465,9

The tensile and yield strength values of 22MnB5 material are reported to increase as the austenitization temperature increases but drop once the turning point is beyond 900°C in the literature [23, 24]. The tensile and yield strengths of the test samples grew and reached their maximum values when the temperature increased from 870°C to 890°C, according to the results shown in Tables 1 and 2. As the temperature increased further, the strength values declined. The values obtained were thought to be compatible and consistent with the literature, and this holds true for both of the materials utilized in the experiment.

The highest tensile strength and the highest yield strength of the MAT1 test samples were determined to be 1831.30 MPa and 1283.68 MPa, respectively, under the test circumstances of 240 seconds of soaking time and 890°C austenitization temperature. Again, under 240 seconds of soaking time and 890°C austenitization temperature test circumstances, the maximum tensile strength and yield strength values for the MAT2 test specimen were attained.

The obtained results indicate that when the materials' microstructure is heated in the ferrite phase at ambient temperature and the austenitization temperature is exceeded, the austenite transformation is optimal in these conditions. The statistics in the table indicate that 240 seconds is largely adequate for completing the transformation, and the strength values fall when the time that produces the maximum result is increased further.

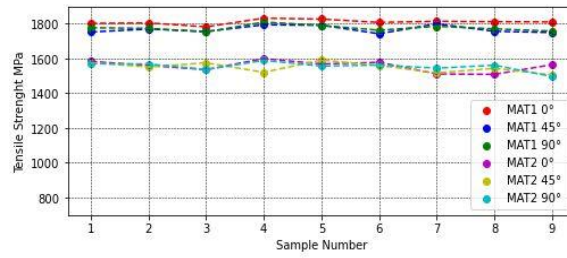


Figure 5. Tensile Strength Test Results of Samples

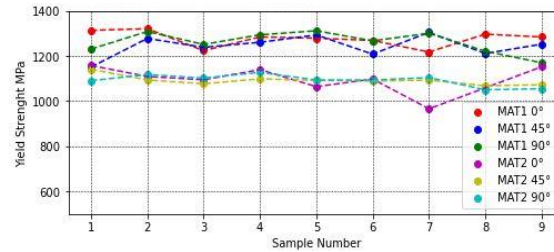


Figure 6. Yield Strength Test Results of Samples

The test results for the tensile and yield strengths of 0, 45 and 90° according to the rolling direction of 9 test specimens for MAT1 and MAT2 materials are presented in Figure 5 and Figure 6. According to Figure 2, tests conducted in the same direction as the 0° rolling direction had the maximum tensile strengths. The results of the testing for 0, 45, and 90° between yield strengths are represented in Figure 6 as Rp0,2 yield values. Since the materials of the AHSS group and high-strength steels do not have a significant yield point and exhibit brittle fracture, theoretically, 0.2% yield stress values are estimated. The resultant values are so distinct from one another.

Prior to the martensitic transformation, the 22MnB5 hardness value was 150HV; however, if a full martensite structure is achieved after the transformation, the hardness value should be above 450HV [23].

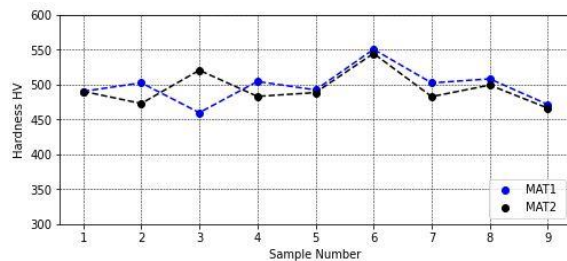


Figure 7. Vickers Hardness Values of Samples

The experimentally measured hardness values indicate that the structure undergoes martensite transition at a high rate (often above 95%). The variations in hardness values show that martensite is forming in the structure, along with an accumulation of leftover austenite grains at the grain boundaries and other phases like bainite. For MAT1 and MAT2, the greatest Vickers hardness values were measured to be 550.1 HV and 544.2 HV, respectively.

For both materials, the greatest value was attained at 890°C and 720 seconds of soaking time. These process variables lead to the conclusion that the austenite structure has undergone martensite transformation. Figure 7 displays a graphic representation of the experimental samples' hardness values.

Values for hole expansion ratios are one way to compare the formability capabilities, particularly for high strength steel sheets. By using a conical punch to expand the hole on the sheet material, the hole expansion ratio value is computed using formula (3) in accordance with the relationship between the diameter after the first fracture in the hole and the first diameter. The diameter measured after the creation of a crack in the hole made by the punch in the sheet metal is represented by the D_h value in the equation, whereas D_0 represents the initial diameter value [25].

$$\lambda = \frac{D_h - D_0}{D_0} \times 100 \quad (3)$$

Experimental items; Table 4 provides the hole sizes and hole expansion heights following crack formation. Figure 8 illustrates the first crack that appeared during the test. Comparing the hole expansion values reveals that the MAT2 material, which is seen to have a 51.36% value, can be deformed more easily than the MAT1 material, which recorded a 30% value.

Table 4. Experimental Samples Hole Expansion Test Results

Material	Average hole diameter (mm)	Hole expansion ratio λ (%)
MAT1	13,37	33,71
MAT2	15,13	51,36

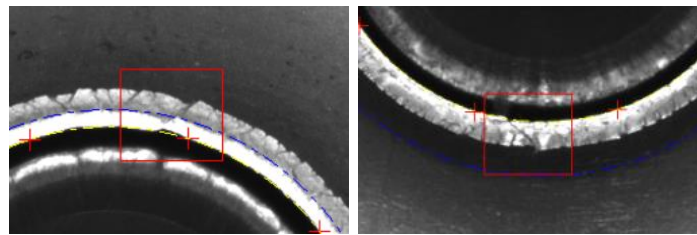


Figure 8. Hole Expansion Test Results of Samples a) MAT1 b) MAT2

After analyzing the samples' mechanical characteristics, SEM analysis was used to look at their microstructures. Each sample underwent SEM analysis at four distinct magnifications, including 500x, 2000x, 5000x, and 10000x. SEM images obtained at 5000x and 10000x for 240 second soaking time and 890°C austenitization temperature, which are the parameters of the best results obtained as a result of mechanical analysis, are shown in Figure 9 and Figure 10.

In the hot stamping technique, which is used for experimental work, the material was austenitized to alter the microstructure before being quickly cooled. It was anticipated that martensite would make up the majority of the material microstructure after the study's chosen cooling rate of 30°C/min. When the pictures in Figures 9 and 10 were analyzed, it was discovered that the microstructure had developed an acicular martensite phase as well as a bainite phase.

The residual austenite in the figures is also present, but it is enclosed by the acicular martensite phase and cannot undergo martensitic transformation.

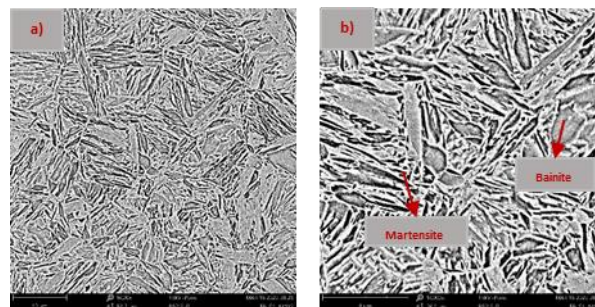


Figure 9. SEM Images of MAT1 at 240sec 890°C a) 5000x b) 10000x

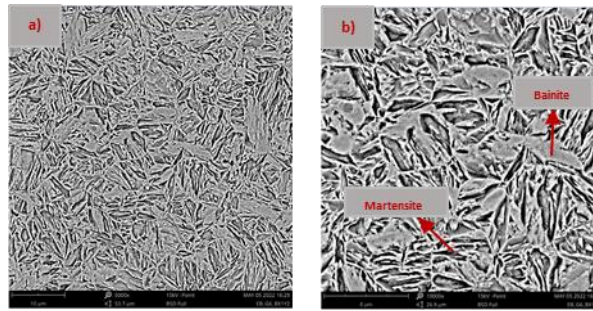


Figure 10. SEM Images of MAT2 at 240sec 890°C a) 5000x b) 10000x

As the second-hardest phase after cementite, martensite plays a significant role in steels. The martensite phase produced by the phase transformation enhances the mechanical properties of the steels, particularly in high carbon steels. The MAT1 material has higher hardness and tensile strength values, according to the experimental results.

The acicular martensite phase is shown to be more homogeneous in MAT1 samples when compared with SEM pictures. For MAT2 material, bainite and residual austenite are more typical. The MAT2 material's hardness values will rise as a result.

4. Discussion and Conclusion

In this investigation, material from two separate steel producers was created using the hot stamping method for 22MnB5 new generation high strength steel. The impact of process parameters on material properties was examined for the conventional hot stamping procedure using various austenitization temperatures and furnace soaking times. The findings of the present investigation are outlined as follows:

- 1) The average value for the tensile and yield strength values for the MAT1 material is 1809.55 MPa, while the average value for the MAT2 material is 1556.30 MPa. When the two materials' microstructures are compared, it can be shown that MAT1 has a larger ratio of martensite phase than MAT2. The %C ratio is larger in the MAT2 material when the chemical compositions of the materials are compared, and because C atoms cannot diffuse freely, this results in the creation of various phases at the grain boundaries. It has been noted that the tensile and yield strengths of the material are attained at lower levels as a result of the production of residual austenite and bainite. When the findings were reviewed in light of the process parameters, it was found that cutting down on the soaking time in the furnace improved the tensile and yield strengths, with the greatest results coming from 240s. The maximum values for the austenitization temperature are achievable at 890°C.
- 2) The tensile and yield strengths of the MAT1 material show greater values when the hardness measurements are evaluated; the hardness value rises as the soaking period at 890°C increases. At this temperature, the hardness value reached 550.1 HV. Even if high hardness values are expected results for new generation advanced high strength steels, easy formability should be at the forefront.
- 3) When the hole expansion values are compared, as 51.36%, it has been found that MAT2 material can be formed more readily than MAT1 material, which can be formed to a lesser extent when the ratios of C and alloying elements drop.
- 4) When the microstructure is analyzed, the greater rate of martensite phase found for MAT1 also contributes to the material's favorable mechanical characteristics. The most homogeneous martensite phase is produced when the austenitizing temperature of 890°C is reached, according to observations. It was found that as the residence time in the furnace increased, martensites began to develop other phases, like residual austenite.

The automotive industry is a vibrant, ever-evolving sector with a fierce rivalry that incorporates technology advancements. The hunt for novel materials that will suit the light and mechanical requirements in the automotive has boosted interest in advanced high-strength steels, along with the environmentalist strategies that have been the center of attention in recent years. There are several steel producers around the world, and much like in this

study, materials with similar levels of quality but different attributes have found a market for themselves. The choice of material becomes one of the key concerns for the automotive sector with this method.

All automotive equipment sources meet the fuel economy target by weight according to Institutional Average Fuel Economy (CAFE) standards and international measurement regulations. The fuel economy target is challenging for most countries, in order to minimize the damage to the CO₂ emission transmissions spent on passenger services. In particular, the United States has set its 2025 target as 89 g/km of average CO₂ emissions, reducing it by about 40% compared to 2015, thanks to the nature of lighter, stronger and greener cars. It is therefore essential to tap into new resources and design more efficiently for the cars of the future [26].

As seen in the study, the materials belonging to two different steel producers differ in terms of mechanical properties and thus their ability to be formed. When choosing the material if the vehicle part to be manufactured is safety parts that must have high strength values, MAT1 will be ideal for this choice. However, in some cases, in order to prevent problems such as tears and cracks in the part encountered during production, it may be necessary to choose a material with better formability but also provide the necessary mechanical properties. For certain parts, MAT2 would be the ideal choice in these situations. Considering the work done, it is important to understand the material properties to be used correctly and to evaluate the design and manufacturing processes as a whole before the material selection is made. Before choosing a material, it is crucial to understand its properties in order to use them appropriately and to assess the design and production processes as a whole.

Acknowledgment

The authors are kindly grateful for the financial and technical support of the Research & Development Center of Toyotetsu Turkey. The authors also would like to acknowledge that this paper is submitted in partial fulfillment of the requirements for the Ph.D. degree at Yildiz Technical University Mechanical Engineering Department.

References

- [1] M. A. Fentahun, M. A. Savas. 2018. Materials Used in Automotive Manufacture and Material Selection Using Ashby Charts, *International Journal of Materials Engineering*, 8, 40-54.
- [2] B. Tang, F. Wu, Q. Wang, C. Li, J. Liu, H. Ge 2020. Numerical and Experimental Study On Ductile Fracture Of Quenchable Boron Steels With Different Microstructures, *International Journal Of Lightweight Materials And Manufacture*, 3, 55-65.
- [3] G.Belingardi, A.T. Beyene, E.G. Koricho, B. Martorana. 2017. Lightweight Solutions For Vehicle Frontal Bumper: Crash Design And Manufacturing Issues, Dynamic Response And Failure Of Composite Materials And Structures.
- [4] S. Soni, S.K. Pradhan. 2020. Improving Crash Worthiness And Dynamic Performance Of Frontal Plastic Automotive Body Components, *Materials Today: Proceedings*, 27, 2308-2313.
- [5] Y. Xu, Y. Gong, H. Du, W. Ding, B. Zhu, X. Jin, Y. Zhang, L. Wang, A Newly Designed Hot Stamping Plus Non-Isothermal Q&P Process to Improve Mechanical Properties of Commercial QP980 Steel, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 3 (2020) 26-35.
- [6] Baluch, N. 2014. Advanced High Strength Steel in Auto Industry: An Overview, *Engineering, Technology & Applied Science Research*, Vol. 4, No. 4, 686-689.
- [7] M.M. Daavoodi, S.M. Sapuan, A. Aidy, N.A. Abu Osman, A.A. Oshkour, W.A.B. Wan Abas. 2012. Development Process of New Bumper Beam for Passenger Car: A Review, *Materials and Design*, 40, 304-313.
- [8] B.C. Kandpal, D.K. Gupta, A. Kumar, A.K. Jaisal, A.K. Ranjan, A. Srivastava, P. Chaudhary. 2021. Effect Of Heat Treatment on Properties and Microstructure of Steels, *Materials Today: Proceedings*, 44 , 199-205.
- [9] M. Nikraves, M. Naderi, G.H. Akbari. 2012. Influence of Hot Plastic Deformation and Cooling Rate on Martensite And Bainite Start Temperatures in 22mnb5 Steel, *Materials Science And Engineering A*, 540, 24-29.

- [10] T. Taylor, A. Clough. 2018. Critical Review of Automotive Hot-Stamped Sheet Steel From an Industrial Perspective, *Materials Science and Technology*, 34, 809-861.
- [11] Z.Y. Chang, Y.J. Li, D. Wu. 2020. Enhanced Ductility and Toughness in 2000 MPa Grade Press Hardening Steels by Auto-Tempering, *Materials Science and Engineering*, Volume 784, 139342, ISSN 0921-5093, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139342>.
- [12] G. Mandal, C. Roy, S.K. Ghosh, S. Chatterje. 2017. Structure-Property Relationship in a 2 GPa Grade Micro-Alloyed Ultrahigh Strength Steel, *Journal Of Alloys And Compounds*.
- [13] S.N Aquida, N. Aziz. 2013. Optimization of Quenching Process in Hot Press Forming of 22MnB5 Steel for High Strength Properties for Publication in IOP Science.
- [14] O. Cavusoglu, O. Cavusoglu, A.G. Yilmazoglu, U. Uzel, H. Aydin, A. Gural. 2020. Microstructural Features And Mechanical Properties of 22MnB5 Hot Stamping Steel in Different Heat Treatment Conditions, *Journal of Materials Research and Technology*, 9, 10901-10908.
- [15] L. Gohem, L. Cho, J.G. Speer, K.O. Findley. 2019. Influence of Austenitizing Parameters on Microstructure And Mechanical Properties of Al-Si Coated Press Hardened Steel, *Materials&Design*, 172, 107707.
- [16] J. Shi. 2018. Investigation of the Effects of Heating & Quenching on the Mechanical Properties and Microstructure of 22MnB5 Steel Sheet, *Electronic Theses and Dissertations*.
- [17] G. Venturato, M. Novella, S. Bruschi, A. Ghiotti, R. Shivpuri. 2017. Effects of phase Transformation in Hot Stamping Of 22MnB5 High Strength Steel, 17th International Conference on Sheet Metal, 183, 316-321.
- [18] Metallic materials — Tensile testing — Part 1: Method of test at room temperature, TS EN ISO 6892-1 standarts.
- [19] Reciprocating positive displacement pumps and pump units - Technical requirements, ISO 16330-2009 standarts.
- [20] Toyota Engineering Standarts, TSG2309G standarts.
- [21] Metallic materials - Vickers hardness test - Part 1: Test method, TS EN ISO 6507-1 standarts.
- [22] M. Merklein, J. Lechler, M. Geiger. 2006. Characterisation of the Flow Properties of the Quenchenable Ultra High Strength Steel 22MnB5, *CIRP Annals*, 55, 229-232.
- [23] J. Zhou, B. Wang, M. Huang, D. Cui. 2014. Effect of Hot Stamping Parameters on the Mechanical Properties and Microstructure of Cold-rolled 22MnB5 Steel Strips, *International Journal of Minerals*, 21, 544.
- [24] H. Lian-fang, Z. Guo-gun, L. Hui-ping, X. Nan. 2011. Research on Mechanical Properties of 22MnB5 Steel Quenched in a Steel Die, Springer, Berlin, Heidelberg.
- [25] X. Chen, H. Jiang, Z. Cui, C. Lian, C. Lu. 2014. Hole Expansion Characteristics of Ultra High Strength Steels, 11th International Conference on Technology Of Plasticity, 81, 718-723.
- [26] Zhang, W., Xu, J., 2022. Advanced lightweight materials for Automobiles: A review, *Materials&Design*, 221, ISSN 0264-1275.

Fluid-structure coupled simulation-based investigation and thrust/efficiency calculation for a UAV twin-blade propeller

Metin UZUN¹, Hasan ÇINAR², Abdullah KOCAMER³, Sezer ÇOBAN^{*4}

^{1,2,3,4*} Iskenderun Technical University, Department of Airframe and Powerplant Maintenance, 31200, Iskenderun, Hatay, Türkiye.

(Alınış / Received: 25.03.2023, Kabul / Accepted: 26.05.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 31.08.2023)

Keywords

Propeller aerodynamics,
Thrust,
UAV,
Propeller design

Abstract: This study presents a coupled numerical investigation consisting of fluid and structural analysis for a UAV propeller. Flow and structural analysis are carried out in ANSYS Fluent and Static Structural modules, respectively. The mechanical properties of the propeller are investigated for Plastic ABS and Carbon Fiber (395 GPA) materials at 2000, 6000, and 10000 rpm rotational speeds. Consequently, it is observed that the total deformation and equivalent elastic strain of Carbon Fiber (395 GPA) material are less at all rotational speeds. In addition, the thrust and power of the propeller are calculated for these rotational speeds and their change in UAV forward speeds (1, 5, 8, 10, and 12 m/s) is examined at 6000 and 10000 rpm. Accordingly, it is observed that the power and thrust of the propeller decreased with the increase in the forward speed of the UAV at constant propeller rotation speed. It has been observed that the propeller produces 5 N thrust at 6000 rpm. In addition, in 6000 rpm and 0.3 advance ratio, the propeller provided approximately 65% efficiency.

Çift palli bir insansız hava aracı pervanesinin, akışkan ve yapısal tabanlı simülasyonu ile itki/verim hesaplaması

Anahtar Kelimeler

Pervane Aerodinamiği,
İtki,
İHA,
Pervane Tasarımı

Öz: Bu çalışma, bir İHA pervanesi için akışkan ve yapısal analizden oluşan birleşik bir sayısal araştırma sunmaktadır. Akış ve yapısal analiz sırasıyla ANSYS Fluent ve Static Structural modüllerinde gerçekleştirilmiştir. Pervanenin mekanik özellikleri Plastik ABS ve Karbon Fiber (395 GPA) malzemeler için 2000, 6000 ve 10000 rpm dönüş hızlarında incelenmiştir. Sonuç olarak, Karbon Fiber (395 GPA) malzemenin toplam deformasyonunun ve eşdeğer elastik gerinimlerinin tüm dönüş hızlarında daha az olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca bu dönüş hızları için pervanenin itkisi ve harcadığı güç hesaplanarak İHA ileri hızlarındaki (1, 5, 8, 10 ve 12 m/s) 6000 ve 10000 rpm'deki değişimleri incelenmiştir. Buna göre sabit pervane dönüş hızında İHA'nın ileri hızının artmasıyla pervanenin harcadığı güç ve itkisinin azaldığı görülmektedir. Pervanenin 6000 devirde 5 N itki ürettiği gözlemlenmiştir. Ayrıca 6000 rpm ve 0.3 ilerleme oranında pervane yaklaşık %65 verim sağlamıştır.

*Corresponding Author, email: sezer.coban@iste.edu.tr

1.Introduction

The propeller is an important component in the propulsion system of an unmanned aerial vehicle, which affects the performance and power consumption of the UAV [1,2]. The aerodynamic performance of propellers directly affects many parameters such as flight time, range, and power consumption of UAVs [3,4]. For these reasons, examining the efficiency and thrust production of the propeller in terms of aerodynamics is among the important research topics in unmanned aerial vehicles.

The aerodynamic performance of propellers can be studied with experiments in a wind tunnel or numerical studies by using computational fluid dynamics (CFD) [5]. The equations used for the aerodynamic performance analysis of the propellers are given in Equations 1-4 [6,7]. The advance ratio (J), thrust coefficient (C_T), power coefficient (C_P), and efficiency (η) of the propeller are expressed by Equations 1,2,3, and 4, respectively. Propeller measurements and calculations are non-dimensionalized to acquire the performance data. The power and thrust coefficient can be calculated by using CFD data for a propeller (Equation 1-2). In these equations, V (m/s), T (N), ρ (kg/m³), D (m), and n (rpm) are the free stream velocity, the thrust produced by a propeller, the density of the air, the diameter of a propeller, and the rotational speed of the propeller, respectively. For hovering flight phases, J becomes zero (because V is zero).

$$J = \frac{V}{nD} \quad (1)$$

$$C_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (2)$$

$$C_P = \frac{P}{\rho n^3 D^5} \quad (3)$$

$$\eta = J \frac{C_T}{C_P} \text{ or } \eta = \frac{TV}{P} \quad (4)$$

Many researchers have presented various numerical aerodynamics studies for UAV propellers using CFD to increase the efficiency of the propeller. For instance, authors in Reference [8] examined the effect of propeller position on the performance of a fixed-wing 25 kg small-class UAV by using CFD. In Reference [5], the aerodynamic performance of the Small APC Slow Flyer Propeller has been examined by CFD and verified with experimental data. Similarly, authors in References [9-11], a literature search was conducted for the calculation of quadrotor unmanned aerial vehicles' propeller thrust and power coefficient and the effects of rotational speed and airspeed on the thrust coefficient for a propeller were investigated using CFD. In Reference [12], the performance of different propeller types at different angles of attack for a solar cell HALE-type (high altitude long endurance) UAV was investigated. In Reference [13], the authors conducted CFD analysis in terms of thrust by adding a winglet to the DJI Spark drone propeller. As a result, they achieved a 21% increase in propeller thrust. In reference [14], the authors conducted aerodynamic shape optimization studies on a UAV propeller in OpenFOAM, resulting in an improvement in the hover performance of this propeller. In reference [15], the structural behavior of the UAV propeller is studied for different material types by using ANSYS software.

According to the literature review presented, it is seen that the focus of propeller numerical analysis studies is propeller performance improvement with the help of CFD. In this context, in this study, to predict aerodynamic performance, numerical analysis studies of a propeller were carried out that can be used in small-type unmanned aerial. The power consumption and thrust production of this propeller at variable speeds were calculated with the help of CFD. In addition, the efficiency, power coefficient, and thrust coefficient of the propeller were calculated using CFD. For this propeller, thrust is calculated for the propeller's constant rotation and the UAV's speed in the longitudinal flight of the unmanned aerial vehicle. The contribution of this study to the literature is to examine the aerodynamic and structural performance of the propeller with a coupled simulation technique consisting of CFD and FE. Thus, using the results obtained from CFD, the mechanical performance of the propeller was investigated for two different material types (Plastic ABS and Carbon Fiber (395 GPa)) in the structural module of ANSYS software. Another contribution is to investigate the thrust production and power consumption of the propeller according to the forward speed of the UAV.

The study is organized as follows. Firstly, the methodology of the study is presented in section 2. Afterward, in section 3, by conducting CFD and FE (finite element) combined simulation studies of the propeller, thrust and efficiency are calculated by investigating pitch angle and rotational speed change. Finally, the results of this study are summarized in the conclusion section.

2.Methodology

The general purpose of this study is to examine the performance of a propeller used in small type unmanned aerial vehicles by considering the computational fluid dynamics and structural analysis together. In this context, Fluent and Static Structural modules were used within the ANSYS package program. The topology of the coupled analysis using these two modules is presented in Figure 1. Fluid simulations were carried out in the Fluent module and the mechanical properties of the propeller were examined by transferring the results to the Static Structural module.

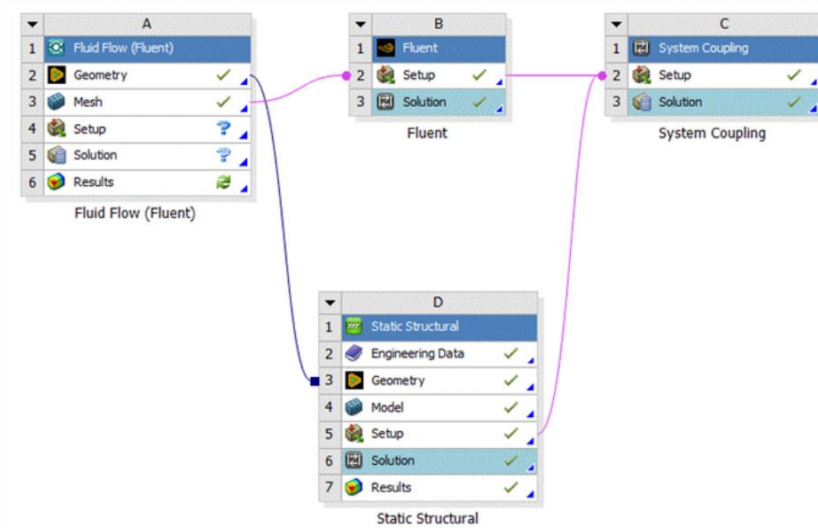


Figure 1. Systematics of coupled analysis consisting of CFD and structural

Propeller designs are generally based on momentum theory, blade element theory, and hybrid blade element momentum theory [21]. The propeller investigated in this study was designed according to the hybrid blade element momentum theory, as explained in detail in the Reference [21]. The thrust that this propeller can produce and its consumption power have been determined through CFD analysis. In the CFD study, the rotating flow field of the impeller is shown in Figure 2. Accordingly, the diameter and thickness of the rotating flow area were determined as 1.1 and 0.4 times the propeller diameter (28 cm), respectively. The flow domain and its dimensions used in CFD simulations are given in Figure 3. Here again, the dimensions of the flow domain are adjusted to be multiples of the propeller diameter. In addition, the picture of the mesh created for the propeller is given in Figure 4.

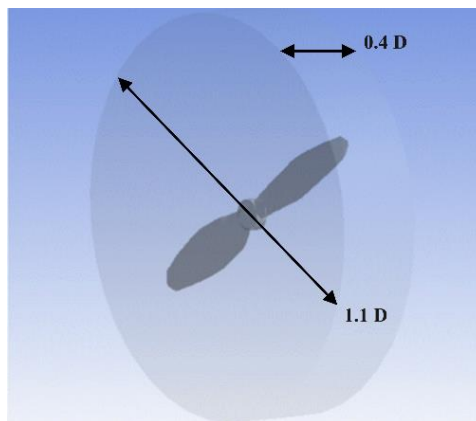


Figure 2. The rotating flow field in which the impeller is located.

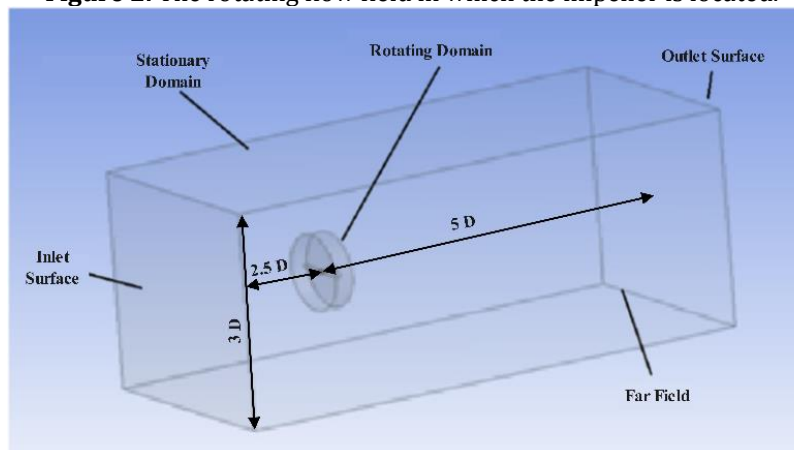


Figure 3. Flow domain of CFD simulation.

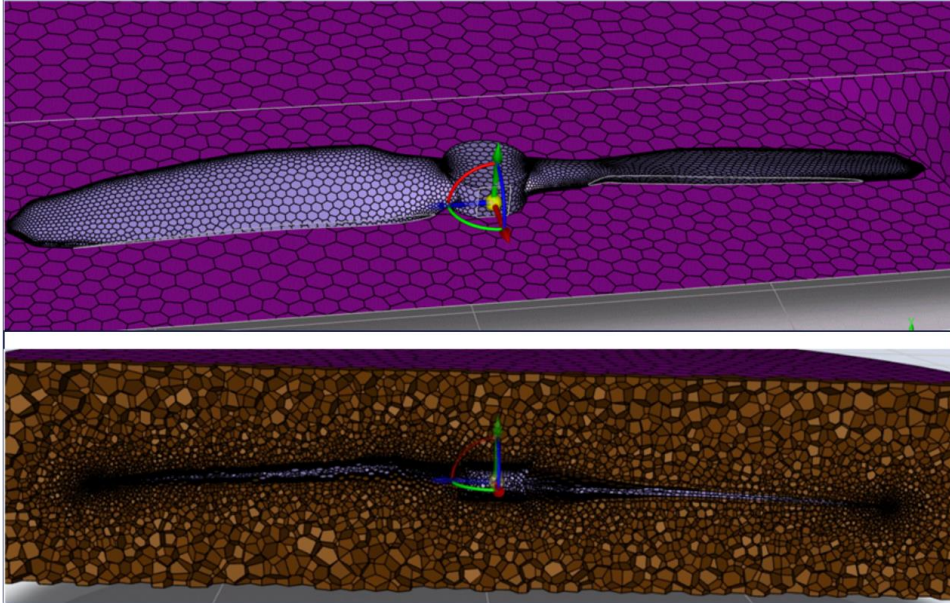


Figure 4. Mesh structure created for the propeller flow field.

Ensuring an irreproachable transition between surface and volume from different mesh element types has always been one of the important problems for simulation programs. ANSYS has started to use polyhedral elements to solve such problems. Polyhedral mesh elements can acquire any shape needed to create a conformal mesh. This property ensures that the transition zone is filled with fewer and higher-quality elements, resulting in a more acceptable result. Polyhedral elements figure out simulations with fewer computational burdens, and with more accuracy. In CFD simulations, the poly-hexcore mesh can improve the resolution time by 20 to 50 percent over a hexahedral core or polyhedral core mesh with the same accuracy [22]. Therefore, poly-hexcore mesh elements were preferred in this study, especially since the use of poly-hexcore mesh elements in the latest versions of ANSYS allows the solutions to be more accurate and to get solutions in a shorter time. The properties of the mesh structure created in the study are summarized in Table 1. In addition, the results of the mesh independence tests are given in Figure 5.

Table 1. Specification of the mesh structure.

Minimum Element Size	0,00005 m	Skewness (max)	0,72599
Number of Elements	2120212	Growth Rate	1,12
Maximum Size	0,1 m	Curvature Normal Angle	18°
Orthogonal Quality	0,2702	Mesh Method	Poly-hexcore

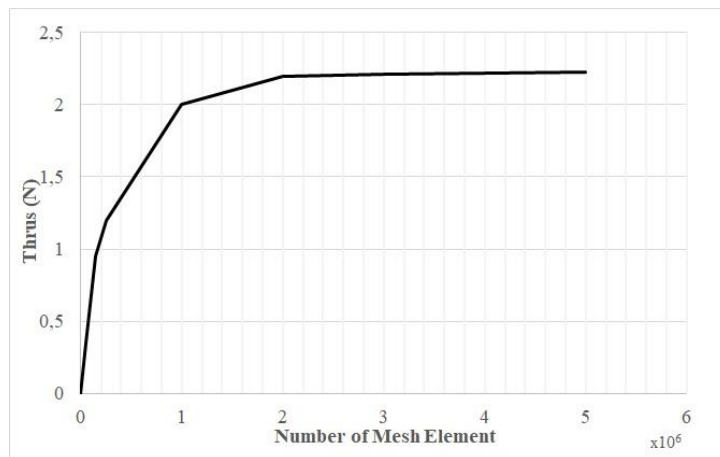


Figure 5. The mesh independence test results

3.Results and Discussion

The design rotation speed of the propeller investigated in this study is 6000 rpm. In other words, it is aimed to reach maximum efficiency at this speed. For this reason, the results presented in this study are presented at design (6000 rpm), lower limit (2000 rpm), and upper limit (10000 rpm) rotational speeds. In addition, these lower and upper limit rotational speeds are determined according to the working range of this propeller. The efficiency, thrust, and consumption power of the propeller were calculated by using Equations 1-4 given in the introduction and the data obtained from the CFD simulations.

The numerical results of the propeller consisting of plastic ABS and Carbon Fiber (395 GPA) materials are given at 3 different rotation speeds (2000, 6000, and 10000 rpm) in Table 2. Accordingly, it was observed that the total deformation of the propeller was big approximately 270%, 224%, and 280%, respectively, at speeds of 2000, 6000, and 10000 rpm for Plastic ABS material than for Carbon Fiber /395 GPA) material. In other words, the total deformation rate of the two materials was approximately 3.5 at these 3 rotational speeds. Similarly, in terms of equivalent elastic strain values, it has been observed that Plastic ABS material provides higher values at all rotation speeds. In addition, the equivalent elastic strain value increased with the increase in rotation speed for each material. When Table 2 is examined, it is seen that the total deformation and Equivalent Elastic Strain values are more dominant in abs material, but shear stress is higher in carbon fiber material at each rev/min. When the regions where the maximum shear stress occurs in the simulation images are examined, it is observed that for carbon material it is in a small area at the blade connection points, and for abs material it is almost the entire blade surface.

Table 2. The mechanical properties of the propeller according to the material and rotational speed.

Material	Number of revolutions (rpm)	Total deformation (m)	Equivalent Elastic Strain	Maximum shear stress (Pa)
Plastic ABS	2000	0,00054195	0,00017201	1,44E-05
Carbon Fiber (395 GPA)	2000	0,0001465	0,00007996	0,000019197
Plastic ABS	6000	0,0044837	0,0015672	1,41E-06
Carbon Fiber (395 GPA)	6000	0,001384	3,3625E-06	1,8235E-06
Plastic ABS	10000	0,01455	0,0045508	0,0065082
Carbon Fiber (395 GPA)	10000	0,0038284	0,0020897	5,0062E-06

In this study, thrust production and power consumption according to the rotational speeds of the propeller examined numerically are given in Figure 6. Accordingly, it has been observed that the thrust production and consumption power produced at the design speed of the propeller are 5 N and 60 W, respectively. These results were found to be compatible with some commercially produced propeller models of the same diameters at the same rotational speed. For example, it was seen that the thrust value produced by the propeller (28x5,5 cm) in this study is compatible with the results of the thrust calculation tool of Mejzlik company for the propeller of the same dimensions [17]. Similarly, it has been observed that the thrust, efficiency, and consumption power for 6000 rpm and 0.3 advance ratio are compatible with the propeller performance data of APC and T-MOTOR companies of the same dimensions [18,19].

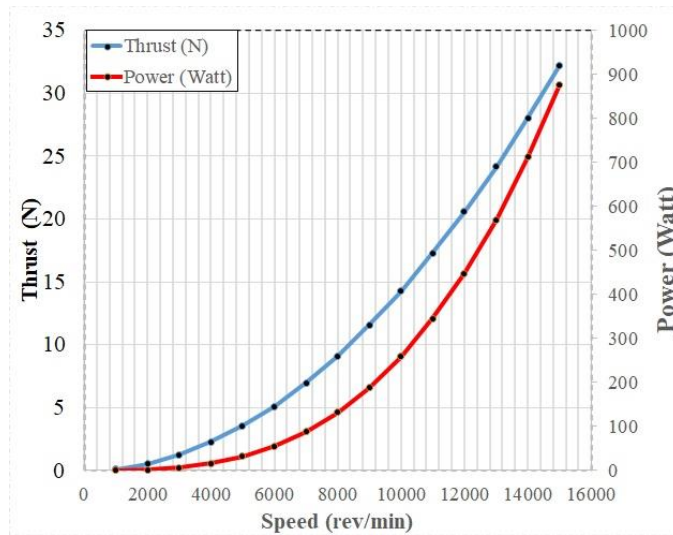


Figure 6. Consumption power and produced thrust according to rotational speed.

The Thrust of the propeller was examined according to the UAV's forward speed at 6000 and 1000 rpm and the results were given in Figure 7. Accordingly, it was observed that the thrust produced by the propeller decreased as the forward speed of the UAV increased at both rotation speeds. This decrease in thrust was found to be consistent with the literature [16]. Similarly, as increased forward speed of the UAV, it was observed that there was a decrease in the power produced by the propeller (please see Figure 8).

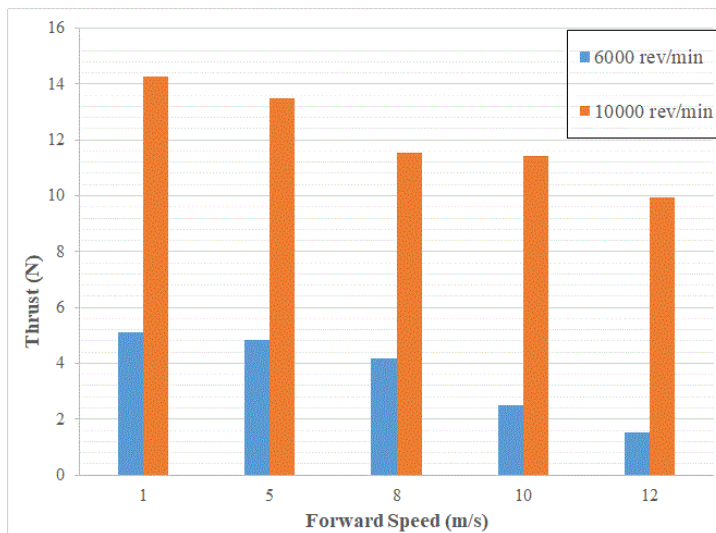


Figure 7. Effect of forward speed on thrust at 6000 and 10000 rpm.

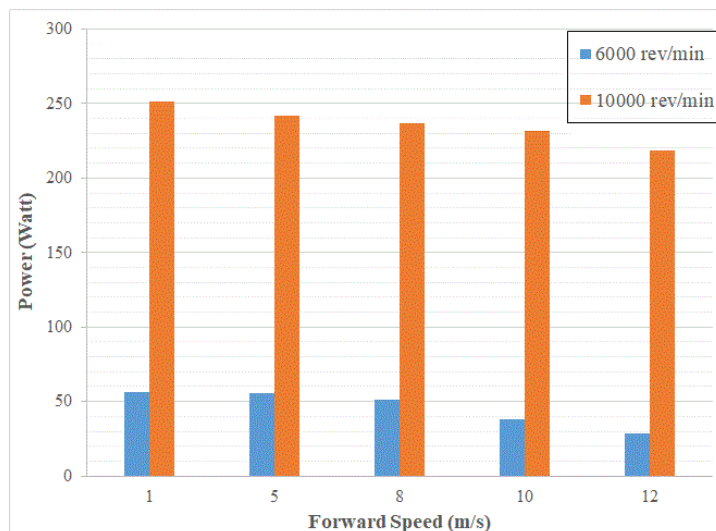
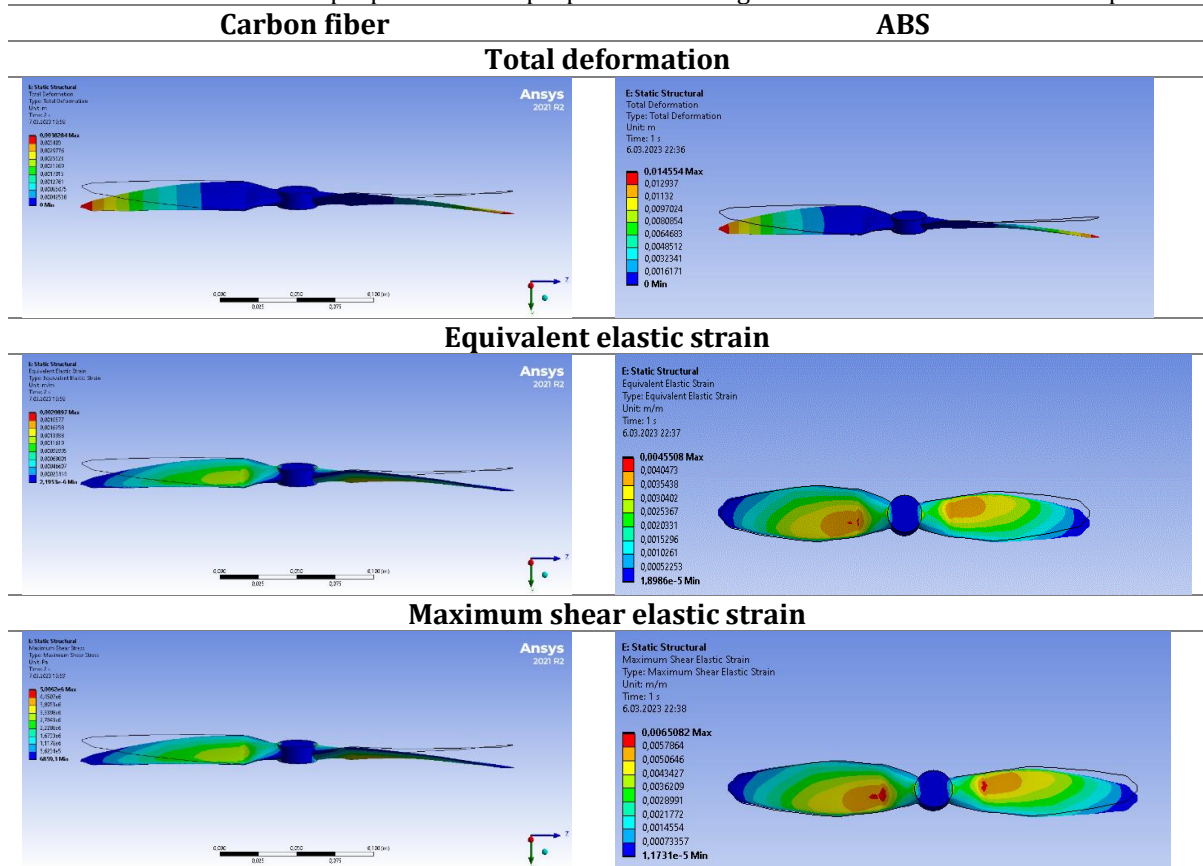


Figure 8. Effect of forward speed on power consumption at 6000 and 10000 rpm.

Mechanical features such as total deformation, equivalent elastic strain, and maximum shear elastic strain obtained from the Fluent-Static Structural coupled analysis of the propeller for Carbon Fiber and ABS materials are for 10000 rpm given in Table 3. The static analysis values of the 2 different material types tested at rev/min and comparatively were expressed as numerical values in Table 2. In Table 3, the static analysis images obtained in the highest rev/min data applied in the study are given. It has been observed that the total deformation occurs higher in the Plastic ABS material at each rev/min compared to the Carbon Fiber (395 GPa) material, especially in the propeller tip chord regions. It is clearly seen in the simulation values that Equivalent Elastic Strain occurs at higher values in ABS material, similarly. The maximum value of shear stress, which is another parameter value in this study, was higher in carbon fiber material. When looking at the shear stress image for each material, it was observed that it was affected in a higher area in the Plastic ABS material, but it was realized in carbon fiber material as the maximum value.

Performance parameters such as thrust, thrust coefficient, power coefficient, and efficiency of the propeller examined in this study were calculated by substituting the data obtained from the CFD analysis in Equations 1-4. Accordingly, the change of power and thrust coefficient with rotational speed was given in Figure 9. In addition, the change in the efficiency of the propeller according to the advance ratio is given for 6000 and 10000 rpm in the same Figure. Accordingly, it has been observed that maximum efficiency is approximately 65% for 6000 revolutions with 0,3 advance ratio.

Table 3. The mechanical properties of the propeller according to the material and rotational speed.



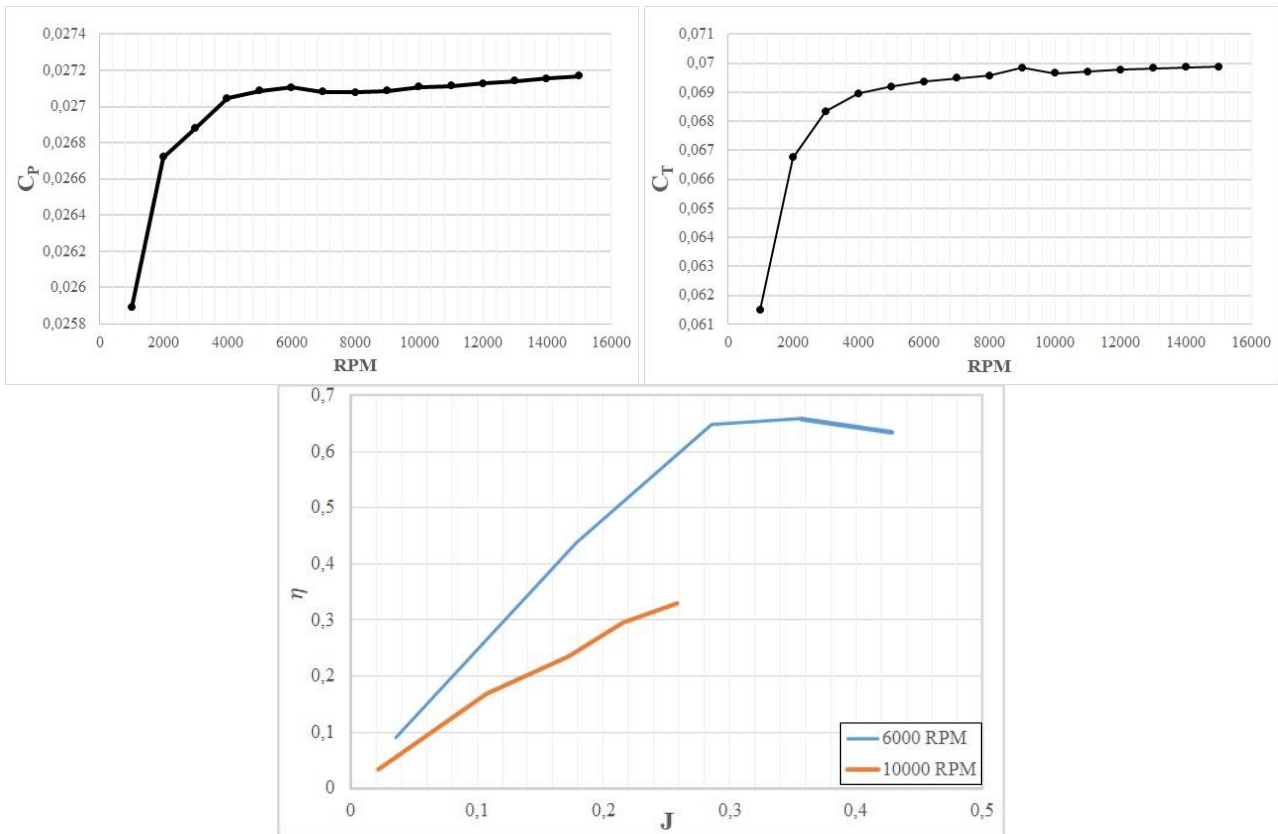


Figure 9. Propeller performance data

Using the Equations 1-4, the performance data of our propeller with a diameter of 28 cm, for which numerical tests were performed at different rpm, are given. The power coefficient and thrust coefficients were calculated according to different rpm values, as well as the propeller efficiency at 1.5, 8, 10, and 12 m/sec forward speeds.

4. Conclusion

In this article, the aerodynamic performance characteristics and numerical analysis results of a propeller are given. CFD analyses on a Navier-Stokes solver were conducted as a numerical method for thrust coefficient estimations. In addition to these, the structural analysis data of our propeller, whose CFD analyses were performed at different rpm, were examined schematically and in tables with 2 different material options. When our propeller is examined in terms of efficiency, both thrust and power consumption increase with increasing rpm data. However, after about 10000 rpm, the power consumption increases more than the generated thrust. When examined in terms of material selection, the deformation that occurs with increasing RPM in ABS material occurs much more than in carbon fiber material.

References

- [1] B. Zhang, Z. Song, F. Zhao, and C. Liu, "Overview of Propulsion Systems for Unmanned Aerial Vehicles," *Energies*, vol. 15, no. 2, 2022, doi: 10.3390/en15020455.
- [2] D. Jimenez, E. Valencia, A. Herrera, E. Cando, and M. Pozo, "Evaluation of Series and Parallel Hybrid Propulsion Systems for UAVs Implementing Distributed Propulsion Architectures," *Aerospace*, vol. 9, no. 2, pp. 1–17, 2022, doi: 10.3390/aerospace9020063.
- [3] C. Cruzatty, E. Sarmiento, E. Valencia, and E. Cando, "Design methodology of a UAV propeller implemented in monitoring activities," *Mater. Today Proc.*, vol. 49, pp. 115–121, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.07.481.
- [4] P. Rajendran and A. Jayaprakash, "Numerical performance analysis of a twin blade drone rotor propeller," *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.10.201.
- [5] H. A. Kutty and P. Rajendran, "3D CFD simulation and experimental validation of small APC slow flyer propeller blade," *Aerospace*, vol. 4, no. 1, 2017, doi: 10.3390/aerospace4010010.
- [6] C. Paz, E. Suárez, C. Gil, and C. Baker, "CFD analysis of the aerodynamic effects on the stability of the flight of a quadcopter UAV in the proximity of walls and ground," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 206, no. June, 2020, doi: 10.1016/j.jweia.2020.104378.
- [7] F. A. Maulana, E. Amalia, and M. A. Moelyadi, "Computational fluid dynamics (CFD) based propeller design improvement for high altitude long endurance (HALE) UAV," *Int. J. Intell. Unmanned Syst.*, vol. 4, 2022, doi: 10.1108/IJIUS-07-2021-0078.

- [8] J. R. Serrano Cruz, A. O. Tiseira, L. M. García-Cuevas, and P. Varela, "Computational study of the propeller position effects in wing-mounted, distributed electric propulsion with boundary layer ingestion in a 25 kg remotely piloted aircraft," *Drones*, vol. 5, no. 3, 2021, doi: 10.3390/drones5030056.
- [9] T. OKTAY and Y. ERASLAN, "Numerical Investigation of Effects of Airspeed and Rotational Speed on Quadrotor UAV Propeller Thrust Coefficient," *J. Aviat.*, vol. 5, no. February, pp. 9–15, 2021, doi: 10.30518/jav.872627.
- [10] T. Oktay and Y. Eraslan, "Computational Fluid Dynamics (Cfd) Investigation Of A Quadrotor Uav Propeller," *Int. Conf. Energy, Environ. Storage Energy (ICEESEN 2020)*, no. June, pp. 1–5, 2020.
- [11] Y. Eraslan, E. Özen, and T. Oktay, "A Literature Review on Determination of Quadrotor Unmanned Aerial Vehicles Propeller Thrust and Power Coefficients," *Ejoms X – Int. Conf. Math. – Eng. – Nat. Med. Sci.*, no. 17-20 May, pp. 1–12, 2020.
- [12] K. You, X. Zhao, S. Z. Zhao, and M. Faisal, "Design and optimization of a high-altitude long endurance UAV propeller," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 926, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/926/1/012018.
- [13] E. Yilmaz and J. Hu, "CFD Study of Quadcopter Aerodynamics at Static Thrust Conditions Electronics thermal management View project Quadcopter aerodynamics View project CFD Study of Quadcopter Aerodynamics at Static Thrust Conditions," no. October, 2018, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/328007354>
- [14] "View of An Open-Source Aerodynamic Shape Optimization Application for an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Propeller.pdf."
- [15] M. Ramesh, R. Vijayanandh, G. Raj Kumar, V. Mathaiyan, P. Jagadeeshwaran, and M. Senthil Kumar, "Comparative Structural Analysis of Various Composite Materials based Unmanned Aerial Vehicle's Propeller by using Advanced Methodologies," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1017, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1017/1/012032.
- [16] C. M. Reed, D. A. Coleman, and M. Benedict, "Force and flowfield measurements to understand unsteady aerodynamics of cycloidal rotors in hover at ultra-low Reynolds numbers," *Int. J. Micro Air Veh.*, vol. 11, 2019, doi: 10.1177/1756829319833677.
- [17] Mejlzlik Company. 2023. Propeller performance prediction tools. https://www.mejlzlik.eu/technical-data/propeller_calculator (Access date: 01.05.2023).
- [18] T-MOTOR Company. 2023. Propeller products. <https://store.tmotor.com/> (Access date: 01.05.2023).
- [19] APC Company. 2023. Propeller performance data. <https://www.apcprop.com/technical-information/performance-data/> (Access date: 01.05.2023).
- [20] University of Illinois at Urbana-Champaign. 2023. APC propeller performance data. <https://m-selig.ae.illinois.edu/> (Access date: 01.05.2023).
- [21] David Lee Wall, 'Optimum Propeller Design for Electric UAVs', Master Thesis, Auburn University, USA.
- [22] ANSYS, ANSYS Fluent Mosaic Technology Automatically Combines Disparate Meshes with Polyhedral Elements for Fast, Accurate Flow Resolution. <https://www.ansys.com/content/dam/resource-center/white-paper/ansys-fluent-mosaic-technology-wp.pdf> (Access date: 01.05.2023).

A conceptual system proposal for real-time detection of jellyfish density in coastal areas from UAV images

Serkan DERELİ^{*1}, Mehmet OKUYAR², Emin GÜNEY³

^{*1}Sakarya University of Applied Sciences, Computer Technologies, SAKARYA

²Sakarya University of Applied Sciences, Electrical and Electronical Engineering, SAKARYA

³Sakarya University of Applied Sciences, Computer Engineering, SAKARYA

(Alınış / Received: 27.03.2023, Kabul / Accepted: 11.08.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 31.08.2023)

Anahtar Kelimeler
watershed algorithm,
jellyfish detection,
computer vision,
embedded systems,
edge computing

Abstract: In this study, a system that can be used in unmanned aerial vehicles is proposed in order to be informed early about the jellyfish infestation in coastal areas due to global warming and to take necessary precautions. The main thing in this research is that the dexterity of unmanned systems in the field of monitoring and information gathering was used to detect jellyfish infestations. In this way, an early warning system can be established for situations that may adversely affect important activities such as tourism and hunting in coastal areas. For this, the Watershed Algorithm, which is one of the classical computer vision techniques and is widely used to detect objects that are overlapped or partially obscure, has been preferred. In order to show that this technique can be used in the detection of jellyfish, in this study, firstly, experiments were performed on a CPU-based system, and then the first system was verified in a second GPU-based system. When the results were examined, the Watershed technique showed a success rate of over 92% in detecting jellyfish. In the same tests performed on the GPU-based embedded system used in unmanned aerial vehicles, similar results were obtained with a change of 1%. Thus, it is considered quite appropriate to use the system created as an early warning system for jellyfish detection.

İHA görüntülerinden kıyı bölgelerindeki denizanası yoğunluğunun gerçek zamanlı tespiti için kavramsal bir sistem önerisi

Anahtar Kelimeler:
Havza algoritması,
Deniz anası tespiti,
bilgisayarlı görme,
gömülü sistemler,
uçta hesaplama

Öz: Bu çalışmada, küresel ısınmaya bağlı olarak kıyı bölgelerinde meydana gelen denizanası istilasından erken haberdar olmak ve gerekli önlemleri almak amacıyla insansız hava araçlarında kullanılabilecek bir sistem önerilmiştir. Bu araştırmadaki asıl mesele, insansız sistemlerin izleme ve bilgi toplama alanındaki maharetinin denizanası istilalarını tespit etmek için kullanılmasıdır. Bu sayede kıyı bölgelerinde turizm ve avcılık gibi önemli faaliyetleri olumsuz etkileyebilecek durumlar için erken uyarı sistemi kurulabilecektir. Bunun için klasik bilgisayarlı görme tekniklerinden biri olan ve üst üste binen ya da kısmen belirsiz olan nesnelerin tespitinde yaygın olarak kullanılan Watershed Algoritması tercih edilmiştir. Bu tekniğin denizanası tespitinde kullanılabileceğini göstermek amacıyla bu çalışmada öncelikle CPU tabanlı bir sistem üzerinde deneyler yapılmış ve daha sonra ilk sistem GPU tabanlı ikinci bir sistemde doğrulanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, Watershed tekniği denizanelerini tespit etmede %92'in üzerinde bir başarı oranı göstermiştir. İnsansız hava araçlarında kullanılan GPU tabanlı gömülü sistem üzerinde yapılan aynı testlerde %1'lik bir değişimle benzer sonuçlar elde edildi. Bu nedenle erken uyarı sistemi olarak oluşturulan sistemin denizanası tespiti için kullanılması oldukça uygun görülmektedir.

*Corresponding Author, email: dereli@sakarya.edu.tr

1. Introduction

Along with the 2000s, we have frequently encountered jellyfish invasions and blooms in both visual media and scientific studies [1]. In the last two decades, it has been observed in research that there may be disturbances in the ecological balance that underlie the increasing extent of this situation. Ecologists attribute the reasons for this to two factors: natural and anthropogenic. While factors such as winds, tides, surface currents, water temperature, salinity and turbidity are shown among natural causes, anthropogenic causes are shown as deterioration of water quality, overfishing, displacement and habitat change [2, 3]. It has been proven by research that jellyfish species, which are known to be resistant to harsh environmental conditions, increase in both cases [4]. As a result of the increase in the jellyfish swarm in a region, decreases in fish diversity will be evident with extreme changes in water temperature and oxygen ratio. this will result in significant decreases in the income status of the people in the region. If the region is at the forefront of tourism activity, then it will have negative effects on the socio-economic status of the people living in the region [5, 6, 7].

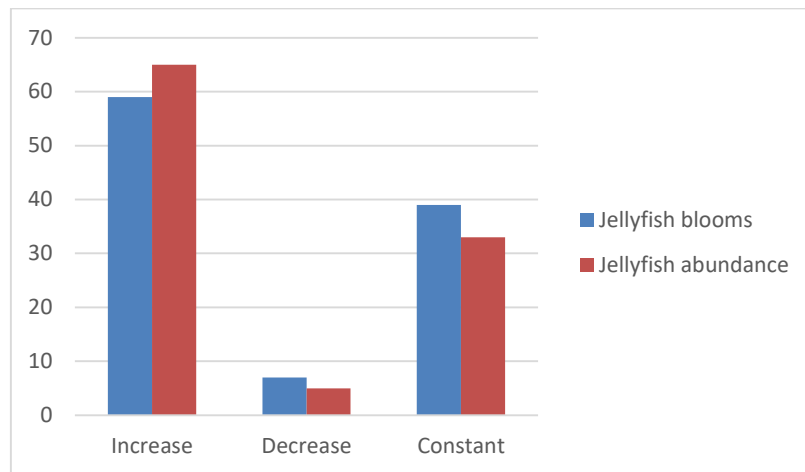


Figure 1. Jellyfish population in the last 10 years in countries (Malta, Italy, Spain, Tunisia)

Figure-1 shows the perception of jellyfish in the last ten years by people living in countries where fishing and tourism are at the forefront, such as Malta, Spain, Italy and Tunisia. Since the study is based on a survey specifically asked to people living in the coastal areas of the country, the results include three statements: increase, decrease and constant. The results clearly show that the density of jellyfish in coastal areas is increasing day by day [8].

Table 1. Effect of jellyfish population on different marine activities (results represent positive answers as a percentage)

	Malta	Italy	Spain	Tunisia
Tourism	95.8	100	100	71.4
Ecosystem	25	22.2	60.6	28.6
Fisheries	29.2	55.6	90.9	28.6
Aquaculture	29.2	77.8	90.9	85.7
Human Health	100	74.4	100	50
Fish Health	28.6	100	100	50

Table-1 shows some of the effects that occur as a result of the increase in the jellyfish population in some countries with a Mediterranean coast. This table actually clearly shows how the increase in the jellyfish population negatively affects city life [8]. It is obvious that with the increase in the jellyfish population, life especially related to fishing and tourism has been severely damaged. Therefore, as it is basically the subject of this study, it is extremely important to determine the reasons for the increase in the jellyfish population in terms of solving the problem and reducing the effects of its damages.

Although there are different techniques in the literature for detecting jellyfish, it is seen that current studies are carried out with deep learning. Han et al. proposed a new deep learning model to detect both jellyfish density and jellyfish species in their study using underwater images [9]. Martin et al. recorded the video obtained with the underwater vehicle and processed it simultaneously in real time. With the deep learning model they created in the system they have established, both jellyfish density and jellyfish species have been successfully determined [10]. Mcilwaine and Casado created an early warning system that detects jellyfish density through a deep learning

model they created using images obtained by the UAV [11]. They created a dataset of 2141 underwater images of seven jellyfish species and some fish. Using the deep learning model they created from this data set, they determined the density of jellyfish in real time [12]. They created a dataset using different environmental videos from coastal areas. Using this data set, they performed tests with the current YOLO algorithms, JF-YOLO and YOLOv4, and increased the success rate up to 92% with the JF-YOLO deep learning model [13].

In this study, jellyfish densities in the images obtained from unmanned aerial vehicles were determined accurately by a method using the watershed algorithm. Accordingly, a conceptual model of an expert system that can make predictions on the recorded data with the artificial learning model to be created after monitoring the jellyfish population and recording the numerical data obtained in certain periods is proposed. In the study, the idea of using the watershed algorithm in the determination of jellyfish density is originality brought to the literature and the system that is out of the idea is proposed conceptually because the other components of the system are already widely used in the literature. When the current literature is examined, it is observed that the deep learning method is dominant in similar studies. In this, preliminary stages such as creating a special model and obtaining many different images for the training and testing of this model are required. However, in this study, classical computer vision technique was applied to a few images and similar results were obtained. In addition, one of the differences of this study from other studies in the literature is that the experiments are carried out both on a PC and in a separate embedded system and their comparisons are made.

2. Material and Method

In this study, a conceptual system is proposed that detects jellyfish infestations, which has become an important problem in coastal cities, by means of aerial monitoring via UAV and uses the data obtained to solve this problem. However, the system was not entirely implemented in the study, but instead focused on the algorithm used to detect jellyfish, which is the most important situation here. For this, images with different densities of jellyfish taken from an unmanned aerial vehicle were used.

2.1. Monitoring Systems Based on UAV

The use of unmanned aerial vehicles has become widespread in the last decade for activities such as monitoring, data collection and instant intervention [14]. Its capabilities such as being easy to obtain due to the widespread use of its technology [15], being able to stay in the air for a long time with advanced battery systems [16], activating the automatic flight system when necessary [17], and communicating with the ground station in real time [18] contributed to the realization of the process much faster.

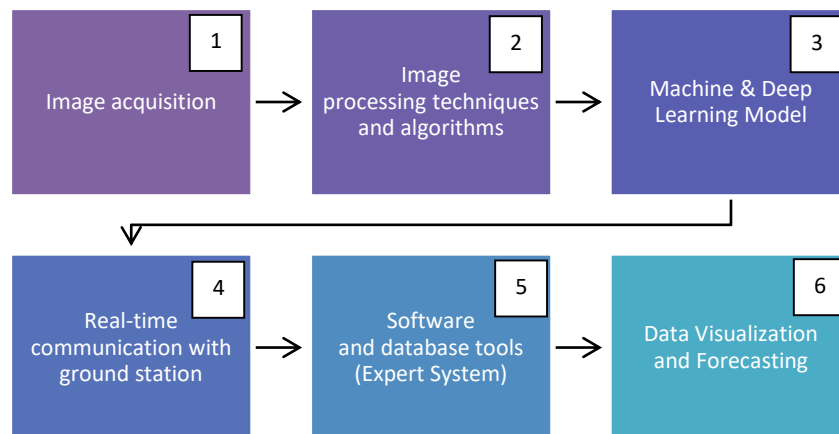


Figure 2. Real-time monitoring system via UAV

The general system diagram used for UAV-based monitoring systems, which is conceptually proposed in this study and is frequently preferred in the literature, is shown in Figure-2. As can be seen in this figure, the process starts with the acquisition of the image with the UAV and as a result of the image processing techniques to be applied to this image, the relevant objects are detected. The third step is completed by transferring the data obtained in the second step to the learning model. Thus, the accuracy of the information obtained from the image processed in the second step is improved. The ground control station, which can be seen as part-4 in Figure-2, is an important part that provides real-time communication with the unmanned aerial vehicle. Through this part, snapshots can be taken from the UAV camera, the environment can be monitored with the camera, or the UAV can be controlled manually. In the next stage, the data transferred from the UAV to the ground station is transferred to the software

that acts as the expert system in the general system. The software not only records the data in relation to date and time, but also improves the system's prediction database. In the last stage, the expert system visualizes the existing data and provides a clearer understanding of the current situation. In addition, it presents possible situations for the next years to the users according to the artificial intelligence algorithm. The proposal realized in this study is in the second part of the general system shown in Figure-2. Because, as can be clearly seen in Figure-3, this study starts with the acquisition of the image and ends with the acquisition of the jellyfish density information in the final stage. From the next stages, this information is interpreted and presented to the authorities in different ways.

Especially in the last decade, it can be seen that the use of UAVs has been widely used in many fields such as agriculture, mining, security, forest fire, traffic, maritime and meteorology. Agricultural field is one of the main areas where many applications of unmanned aerial vehicles are seen, and it stands out in terms of the diversity of applications. Some studies are on increasing the yield by observing the agricultural land with UAV, detecting the stress conditions of the plants and taking the necessary precautions [18, 19]. Again in this area, it is seen that the estimation of the yields of the products after the harvesting process from the images obtained from the field is widely used by combining it with deep learning methods [20, 21]. Another application in this area is the classification of vegetation in the field by using images obtained from unmanned aerial systems. Thus, an important step has been taken to prevent possible damage caused by vegetation [22, 23].

The mining industry is an important field of activity for the discovery of underground riches, and applications in which unmanned aerial vehicles are frequently used are encountered in this field too [24]. When we look at mining studies, three important activities are carried out: exploration, exploitation and reclamation [25]. In the literature, monitoring was carried out by using images obtained from UAV in all three activities [26, 27].

The main purpose of this study is to determine the jellyfish densities by processing the images of the coastal areas monitored by an unmanned aerial vehicle in real time and instantaneously. An artificial intelligence computer is integrated into the unmanned aerial vehicle for real-time processing of images. Images obtained at 10 fps are directly transferred to this artificial intelligence computer and processed. As a result, jellyfish density information is obtained as an output from this computer. In order to test the accuracy of the jellyfish density information obtained in real time with the artificial intelligence computer, the images were reanalyzed in the laboratory environment and the obtained results were compared with the artificial intelligence computer.

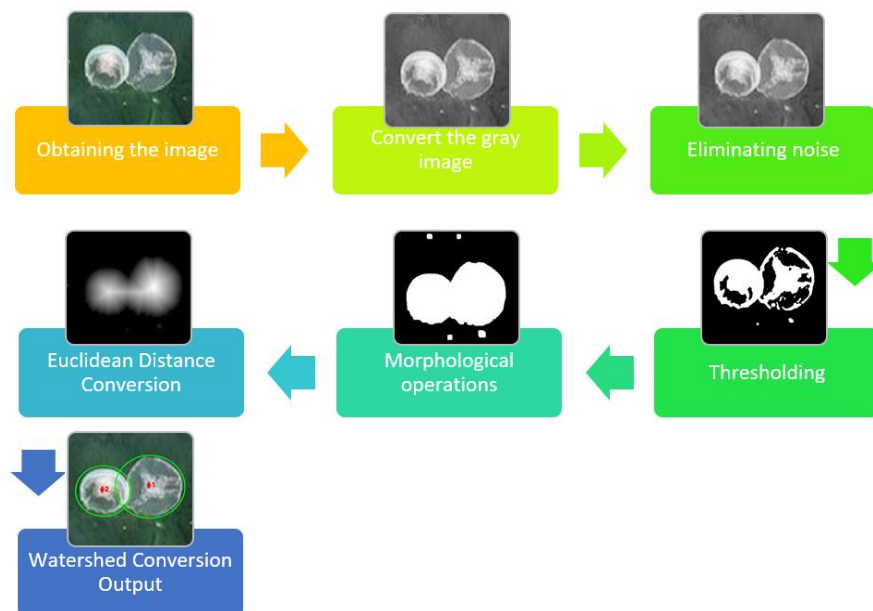


Figure 3. Algorithm steps for detecting jellyfish

Figure-3 shows the algorithm used to subject the images obtained to jellyfish density detection. After performing the Euclidean distance transformation at the end of the classical image processing steps, the algorithm was terminated with the detection of jellyfish with the Watershed segmentation technique.

2.2. Watershed Segmentation Technique

Watershed segmentation based on mathematical morphology is based on the contour structure in grayscale images [28]. As it is known, in an image converted to gray, certain regions have dark tones and certain regions have light tones. The Watershed algorithm considers these dark regions as hills and open regions as valleys. Afterwards, the algorithm performs the process of distinguishing the objects in the image by filling the valleys with water like a basin in the local regions that it has divided into valleys and hills [29]

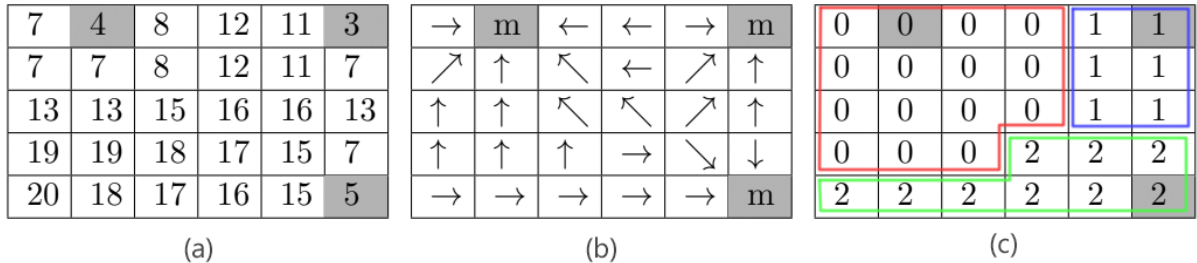


Figure 4. Watershed algorithm based on connected component (a: gray image, b: the connection of each pixel with the smallest value, c: labeling of pixels)

Figure-4 is a very good diagram in terms of describing the operation of the watershed algorithm. Because the algorithm considers these regions as basins based on low and high density pixels and fills them with water. This situation is illustrated in Figure-4b by showing the direction of the pixels towards the lowest pixel. In Figure-4c, the labeling of the pixels was carried out according to the basin structure formed.

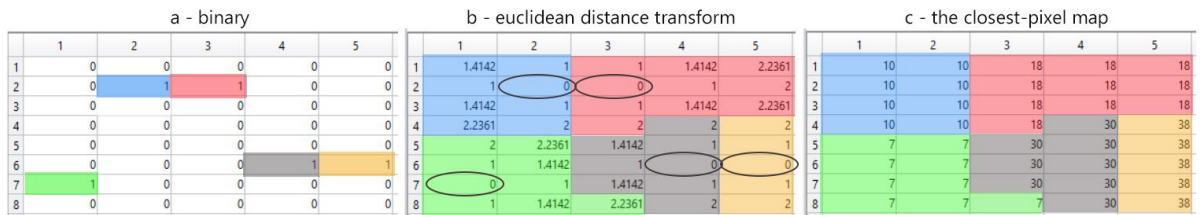


Figure 5. Watershed segmentation based on Euclidean distance transform

Another formation of the Watershed algorithm is the form that segments the binary image with Euclidean distance transform instead of the gray image used in Figure-4, and it is shown in Figure-5. The "a" in this figure represents the binary image and it can be seen that the segmentation transformation actually takes place around the "1s" in this image. In the "b" image, the distance of each pixel to its nearest "0" is calculated. This calculation is known as the Euclidean distance transform. The "c" image is the image where the pixels transform their neighborhood to a map. Thus, the segmentation process is carried out according to these principles, as can be seen here.

2.3. Experimental Installation

As it is known, the topic of artificial intelligence has become the topic of the agenda when artificial neural network algorithms have been instrumental in the emergence of different models over time and these models can be used in many sectors [30]. This situation has led both to the rapid development and diversification of artificial intelligence techniques used. However, this caused algorithms to need more data to work more efficiently. Thus, a large amount of data has emerged that needs to be processed [31]. However, this situation caused the CPU system to become inadequate over time, as it required training a network with thousands of data and required preprocessing of this data over time [32]. To overcome this situation, both academia and industry have focused on multi-core GPUs with sufficient memory resources and parallel processing capability [33].

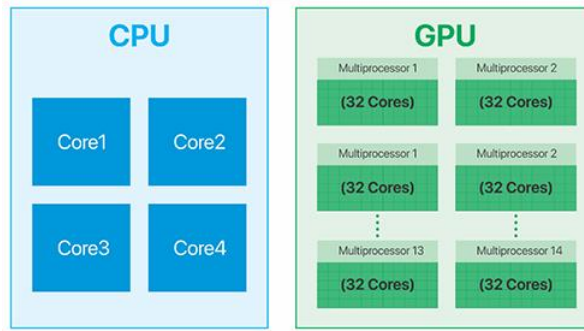


Figure 6. Architecture overview of CPU and GPU.

Figure-6 clearly shows the number of cores that the CPU and GPU architectures have, and even from this figure, the fact that the GPU architecture is multi-core indicates that it has much more performance [34]. This extreme performance of GPUs has over time allowed CPUs to use them as accelerators in big data and then to perform artificial intelligence computing at the edge [35]. Thus, a device with the definition of artificial intelligence computer, whose architecture can be seen in Figure-7, was born [36].

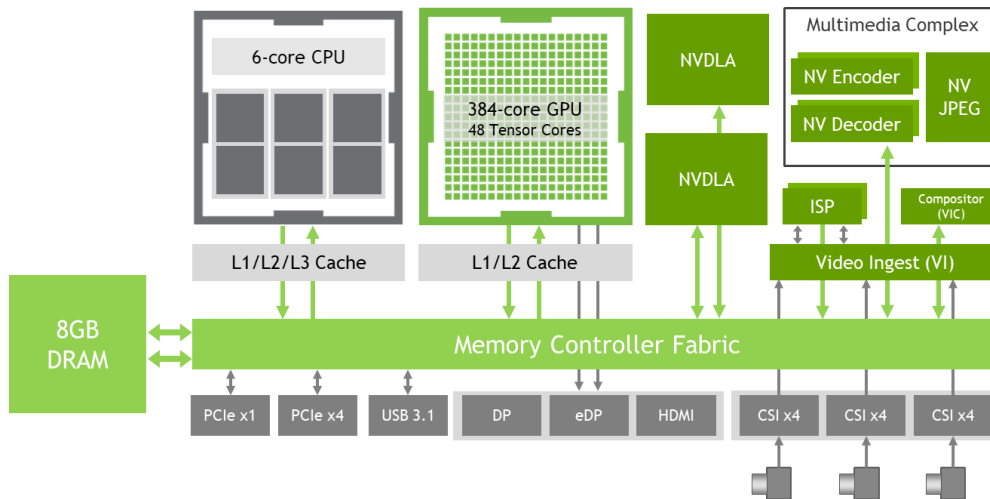


Figure 7. Architecture of the Nvidia Jaton Xavier

As can be seen in Figure-7, the comprehensive block diagram is a highly advanced technology and the device called Jaton can also be used as an embedded system with its portable feature. Not only does the multi-core structure show the sophistication for such a system, but the amount of memory is also very important here. Especially if it is used as an embedded system, the data to be processed in turn should be stored in a temporary memory. Processing data is cached like L1 and L2, and processes are prioritized just like a CPU, allowing the device to perform processes in a much shorter time.

Table 2. Experiment data used in the study (33)

No	Image Resolution	Total Size(MB)	Total Images	Individual Image Size (MB)
1	1024 x 768	216	90	2.4
2	1600 x 900	387	90	4.3
3	1920 x 1080	558	90	6.2
4	2560 x 1440	999	90	11.1

In the literature, the superiority of GPU over CPU has been demonstrated in many studies. In their study where they compared GPU and CPU in terms of efficiency, they performed the test on the images processing. Table-2 contains information about the test data they used in their study, and Figure-8 illustrates the diagram of the data they obtained as a result of the test [37].

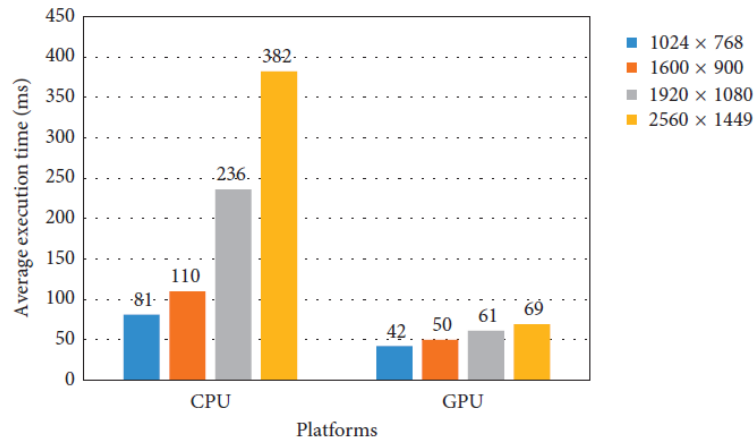


Figure 8. CPU and GPU execution times of different size images [37]

They compared the CPU and GPU in terms of performance by applying three different image processing techniques to images with different pixel sizes in their study. As the results of the study are summarized in Figure-9, the execution time by the CPU increases as the NxM size of the pictures increases. However, this increase is seen very minimal in GPU [38].

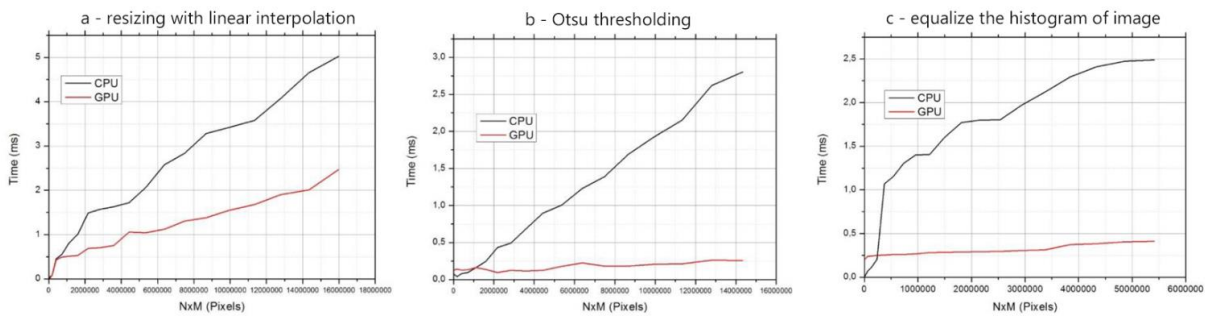


Figure 9. CPU and GPU execution times of different NxM size images

3. Results

In this study, two different systems were used to detect jellyfish through the images obtained: CPU and GPU. While doing this, the aim is to compare the accuracy obtained in the processing performed on the cloud with the CPU with the accuracy of the processing performed on the edge with the GPU and to contribute to the literature in this sense. Therefore, it will be shown that processes can run in real time at the edge by means of an artificial intelligence computer to be mounted on an unmanned aerial vehicle. In this study, the device referred to as artificial intelligence computer is the Jatson Xavier model specially produced by Nvidia company to run artificial intelligence algorithms in a short time with its GPU core structure. The information on the platforms used in the test processes and the results obtained are shown in Table-3.

Table 3. Comparison platform properties

Platform-1: Computer	Platform-2 GPU, Jatson Xavier
<ul style="list-style-type: none"> ○ Intel® Core™ i5-7300HQ6M Cache, up to 3.50 GHz ○ Chipset: Intel® HM175 ○ Geforce® GTX1050 2GB GDDR5 ○ 8 GB DDR4-2400 MHz RAM ○ Windows OS 	<ul style="list-style-type: none"> ○ GPU: 384-core NVIDIA Volta™ architecture-based ○ CPU: 6-core Carmel ARM® v8.2 ○ Memory: 4 GB 64-bit LPDDR4; 25.6 gigabytes/second ○ OS Support: Linux for Tegra® ○ Developer Kit Size: 70mm x 45mm

In the experiments, images obtained from unmanned aerial vehicles in different time periods were used. After detecting the jellyfish in the image, the jellyfish density was calculated. Figure 10 shows the images used in the experiments carried out within the scope of this study and the results obtained as a result of processing these images on the CPU and GPU. Five different images were used in the experiments, and the density of jellyfish in each image varies visibly. In fact, it can be said that as the density increases, the correct detection of jellyfish becomes a little more difficult. The same is true for jellyfish, which are deeper in the water than on the surface. However, as

seen in Table-4, the accuracy of edge computation, which is the main purpose of the study, is clearly seen in these experiments.

Table 4. Comparison of the results obtained in the experiments

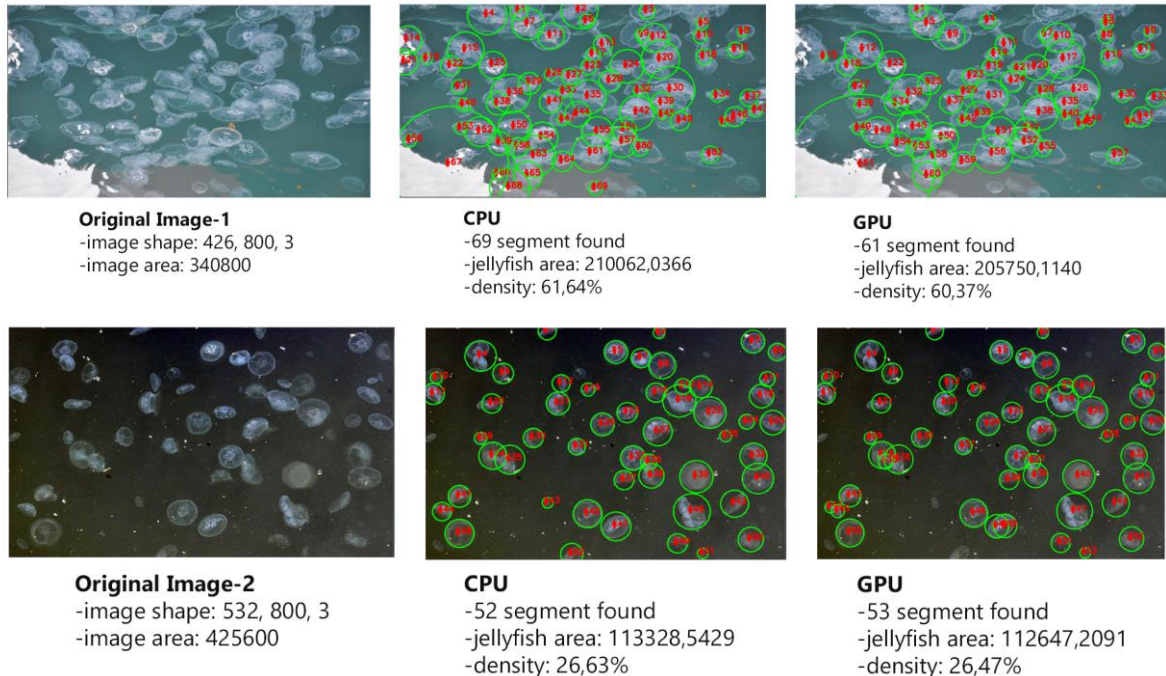
Experiment No	Success Rate	CPU Result	GPU Result	Deviation
1	92%	61,64%	60,37%	1,27%
2	94%	26,63%	26,47%	0,16%
3	95%	23,96%	22,48%	1,48%
4	98%	20,52%	19,38%	1,14%
5	100%	1,93%	1,93%	0%
		Average		0,81%

The versions of libraries operated in the study are given in Table 5. As can be seen from the table, the libraries whose current versions are given have been tested on CPU and GPU simultaneously.

Table 5. Versions of libraries used in the experiments

Feature	Version	Feature	Version
imutils	0.5.4	opencv	4.5.1
matplotlib	3.7.0	scipy	1.9.1
numpy	1.24.2	skimage	0.0

Figure-10 shows the data obtained by processing the images obtained from unmanned aerial vehicles at different times from the coastal regions as a result of experiments. In the first experiment, the proposed technique was able to detect jellyfish with 92% and calculated the density as 60% in CPU and GPU environments. In the second experiment, the number of jellyfish decreased slightly and the detection rate increased to 94%. The density ratio obtained in both CPU and GPU devices is seen as 26%. In the third experiment, the jellyfish detection success of the technique was 95% and the density was 23%. Since the fourth experiment was an image with much less jellyfish, the detection success was 98% and the density ratio was 20%. In the fifth and final experiment, a single jellyfish was seen and was successfully detected. The density of jellyfish in the image was obtained as 1%.



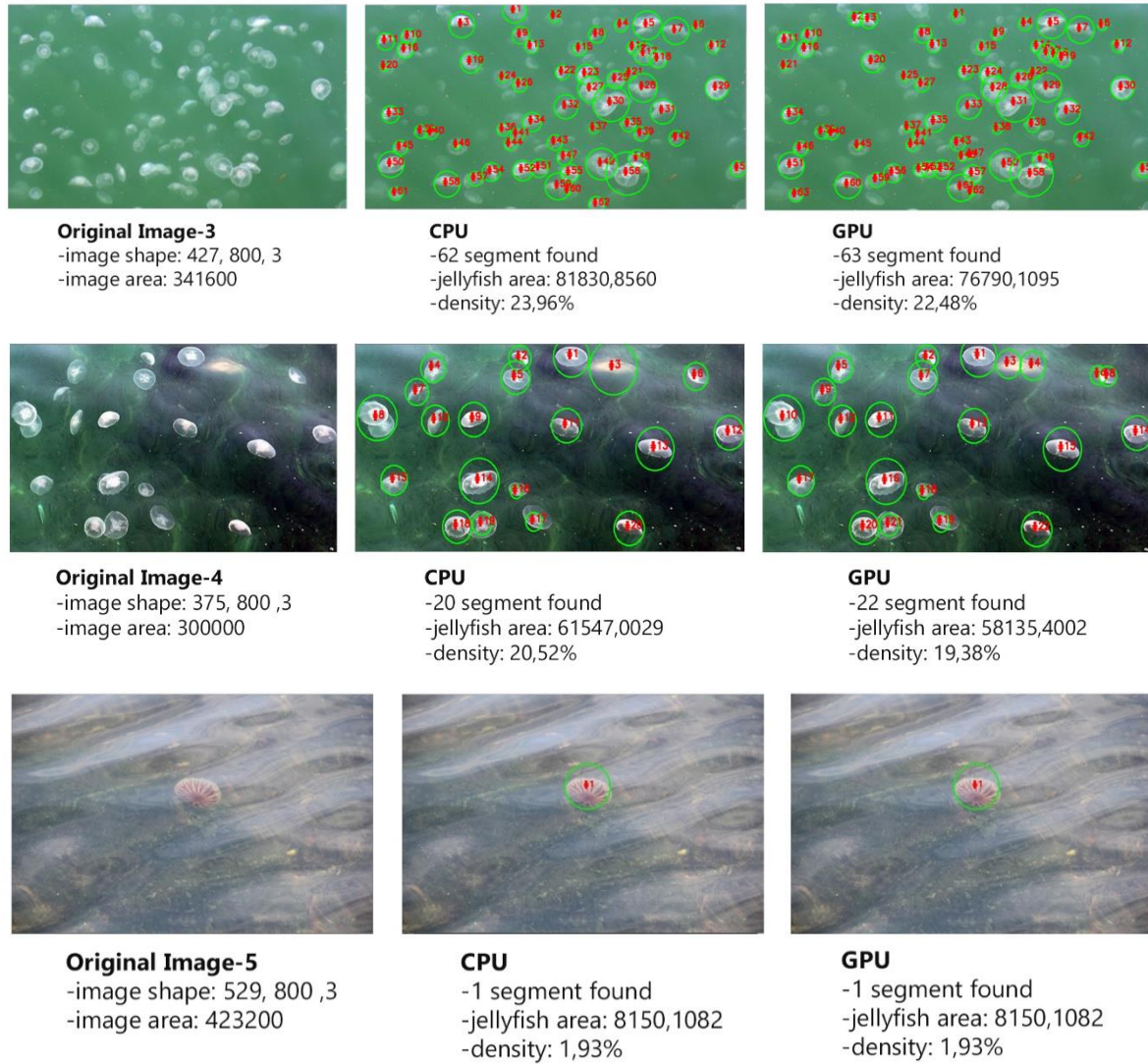


Figure 10. Images used in the experiments and their outputs

Recently, similar studies are generally carried out with deep learning method. However, in order to use deep learning methods, a model must first be created, and then the model must be trained with a lot of data. Therefore, when the deep learning method is desired to be used, the preprocessing stage of the study can be quite laborious. In this study, a similar project was carried out by directly applying a computer vision technique without the need for any preliminary preparation. Therefore, the prominent feature of this study is seen as simplicity. Table-6 shows the data comparing the Watershed Algorithm proposed in this study with the deep learning method used in current studies in the literature. As it is clearly seen in this table, the method proposed in this study showed similar success with the current techniques in the literature in detecting jellyfish density. In addition, while other studies were carried out with PC, the experiments in this study were carried out on the Jatson embedded artificial intelligence device, which is widely used in both PC and unmanned aerial vehicles [39].

Table 6. Summary table comparing some studies from the literature

Ref.	Device	Method	Images used	Details	Accuracy (Avg.)
[9]	PC	Deep Learning	Underwater images	Density Detection and classification	95%
[10]	PC	Deep Learning	Underwater videos	Density Detection and classification	95%
[11]	PC	Deep Learning	UAV images	Density Detection	90%
[12]	PC	Deep Learning (YOLOV3)	Underwater images	Density Detection	91%
[13]	PC	Deep Learning (JF-YOLO)	Different environment videos	Density Detection	92%

This Paper	PC, Jatson	Watershed Algorithm	UAV images	Density Detection	95%
------------	------------	---------------------	------------	-------------------	-----

4. Discussion and Conclusion

In this study, a conceptual system that can be used by an unmanned aerial vehicle and performs computation at the edge is proposed for the detection of jellyfish density, which is one of the most important problems of coastal regions. Therefore, in the study, the accuracy of the algorithm (Watershed) that can be used in this device, together with the device that performs computation only at the edge, is revealed, not the system as a whole. Because the design and implementation of an unmanned aerial vehicle system has been mentioned many times in the literature. The issue here is the way computer vision and artificial intelligence calculations are performed throughout the system. In the study, an artificial intelligence computer with a GPU was used for these calculations, and the Watershed Algorithm was used to detect jellyfish. Images obtained by unmanned aerial vehicles at different times of the day were processed, and the Watershed algorithm was run first on the PC and then on the GPU, which is used as a computing device at the edge. As a result of the experiments, the rate of correctly detecting jellyfish with both devices was over 90%, which clearly demonstrates the success of the algorithm. The variation in the ratio of the CPU and GPU in terms of jellyfish density detection is about 1%. Therefore, this value clearly shows that the Watershed Algorithm can be used in unmanned aerial vehicles with a computational device at the edge. In the future, this work could perform the data collection phase in expert systems such as jellyfish early warning. The collected data can be easily transferred to information systems automatically via a special wireless connection method when the unmanned aerial vehicle arrives at the center. In this way, data can be visualized and in-depth analysis can be performed.

References

- [1] Vandendriessche, S., Vansteenbrugge, L., Derweduwen, J., Maelfait, H., & Hostens, K. (2016). Jellyfish jelly press and jelly perception. *Journal of Coastal Conservation*, 20(2), 117-125.
- [2] Baliarsingh, S. K., Lotliker, A. A., Srichandan, S., Samanta, A., Kumar, N., & Nair, T. B. (2020). A review of jellyfish aggregations, focusing on India's coastal waters. *Ecological Processes*, 9, 1-9.
- [3] Quiñones, J., Mianzan, H., P. S., Robinson, K. L., Adams, G. D., & Marcelo Acha, E. (2015). Climate-driven population size fluctuations of jellyfish (*Chrysaora plocamia*) off Peru. *Marine biology*, 162, 2339-2350.
- [4] Richardson, A., Bakun, A., Hays, G., & Gibbons, M. (2009). The jellyfish joyride: causes, consequences and management responses to a more gelatinous future. *Trends in ecology & evolution*, 312-322.
- [5] Sweetman, A., & Chapman, A. (2011). First observations of jelly-falls at the seafloor in a deep-sea fjord. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1206-1211.
- [6] Ghermandi, A., Galil, B., Gowdy, J., & Nunes, P. (2015). Jellyfish outbreak impacts on recreation in the Mediterranean Sea: welfare estimates from a socioeconomic pilot survey in Israel. *Ecosystem services*, 140-147.
- [7] Sahu, B., Baliarsingh, S., Samanta, A., Srichandan, S., & Singh, S. (2020). Mass beach stranding of blue button jellies (*Porpita porpita*, Linnaeus, 1758) along Odisha coast during summer season. *Indian J Geo-Mar Sci*, 49, 1093-1096.
- [8] Bosch-Belmar, M., Azzurro, E., Pulis, K., Milisenda, G., Fuentes, V., Yahia, O. K., . . . Piraino, S. (2017). Jellyfish blooms perception in Mediterranean finfish aquaculture. *Marine Policy*, 76, 1-7.
- [9] Han, Y., Chang, Q., Ding, S., Gao, M., Zhang, B., & Li, S. (2022). Research on multiple jellyfish classification and detection based on deep learning. *Multimedia Tools and Applications*, 1-16.
- [10] Martin-Abadal, M., Ruiz-Frau, A., Hinz, H., & Gonzalez-Cid, Y. (2020). Jellytoring: real-time jellyfish monitoring based on deep learning object detection. *Sensors*, 20(6), 1708.
- [11] Mcilwaine, B., & Casado, M. R. (2021). JellyNet: The convolutional neural network jellyfish bloom detector. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 97, 102279.

- [12] Gao, M., Bai, Y., Li, Z., Li, S., Zhang, B., & Chang, Q. (2021). Real-time jellyfish classification and detection based on improved YOLOV3 algorithm. *Sensors*, 21(23), 8160.
- [13] Zhang, W., Rui, F., Xiao, C., Li, H., & Li, Y. (2023). JF-YOLO: the jellyfish bloom detector based on deep learning. *Multimedia Tools and Applications*, 1-21.
- [14] Gomez, C., & Purdie, H. (2016). UAV-based photogrammetry and geocomputing for hazards and disaster risk monitoring—a review. *Geoenvironmental Disasters*, 3, 1-11.
- [15] Ke, Y., Wang, K., & Chen, B. (2018). Design and implementation of a hybrid UAV with model-based flight capabilities. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 23, 1114-1125.
- [16] Campion, M., Ranganathan, P., & Faruque, S. (2018). UAV swarm communication and control architectures: a review. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 7, 93-106.
- [17] Gnemmi, P., Changey, S., Wey, P., Roussel, E., Rey, C., Boutayeb, M., & Lozano, R. (2017). Flight phases with tests of a projectile-drone hybrid system. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 26, 2091-2105.
- [18] Zhou, J., Mou, H., Zhou, J., Ali, M. L., Ye, H., Chen, P., & Nguyen, H. T. (2021). Qualification of soybean responses to flooding stress using UAV-based imagery and deep learning. *Plant Phenomics*, 1-13. doi:10.34133/2021/9892570
- [19] Zhou, J., Zhou, J., Ye, H., Ali, M. L., Nguyen, H. T., & Chen, P. (2020). Classification of soybean leaf wilting due to drought stress using UAV-based imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*, 175, 1-9.
- [20] Feng, L., Zhang, Z., Ma, Y., Du, Q., Williams, P., Drewry, J., & Luck, B. (2020). Alfalfa yield prediction using UAV-based hyperspectral imagery and ensemble learning. *Remote Sensing*, 12, 1-24.
- [21] Nevavuori, P., Narra, N., Linna, P., & Lipping, T. (2020). Crop yield prediction using multitemporal UAV data and spatio-temporal deep learning models. *Remote Sensing*, 12, 1-18.
- [22] Zhao, F., Wu, X., & Wang, S. (2020). Object-oriented vegetation classification method based on UAV and satellite image fusion. *Procedia Computer Science*, 174, 609-615.
- [23] Feng, Q., Liu, J., & Gong, J. (2015). UAV remote sensing for urban vegetation mapping using random forest and texture analysis. *Remote sensing*, 7, 1074-1094.
- [24] Park, S., & Choi, Y. (2020). Applications of unmanned aerial vehicles in mining from exploration to reclamation: A review. *Minerals*, 10, 663.
- [25] Johansen, K., Erskine, P. D., & McCabe, M. F. (2019). Using Unmanned Aerial Vehicles to assess the rehabilitation performance of open cut coal mines. *Journal of cleaner production*, 209, 819-833.
- [26] Li, H., Savkin, A. V., & Vucetic, B. (2020). Autonomous area exploration and mapping in underground mine environments by unmanned aerial vehicles. *Robotica*, 38, 442-456.
- [27] Lee, S., & Choi, Y. (2016). Reviews of unmanned aerial vehicle (drone) technology trends and its applications in the mining industry. *Geosystem Engineering*, 19, 197-204.
- [28] Zhang, H., Tang, Z., Xie, Y., Gao, X., & Chen, Q. (2019). A watershed segmentation algorithm based on an optimal marker for bubble size measurement. *Measurement*, 138, 182-193.
- [29] Zhou, J., & Yang, M. (2022). Bone Region Segmentation in Medical Images Based on Improved Watershed Algorithm. *Computational Intelligence and Neuroscience*. doi:10.1155/2022/3975853.
- [30] Shi, Y., Yang, K., Jiang, T., Zhang, J., & Letaief, K. B. (2020). Communication-efficient edge AI: Algorithms and systems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22, 2167-2191.

- [31] Georgis, G., Lentaris, G., & Reisis, D. (2019). Acceleration techniques and evaluation on multi-core CPU, GPU and FPGA for image processing and super-resolution. *Journal of real-time image processing*, 1207-1234.
- [32] Raschka, S., Patterson, J., & Nolet, C. (2020). *Machine learning in python: Main developments and technology trends in data science, machine learning, and artificial intelligence*. Information, 11.
- [33] Dereli, S. (2021). Micro-sized parallel system design proposal for the solution of robotics based engineering problem. *Microsystem Technologies*, 27, 4217-4226.
- [34] Kalaiselvi, T., Sriramakrishnan, P., & Somasundaram, K. (2017). Survey of using GPU CUDA programming model in medical image analysis. *Informatics in Medicine Unlocked*, 9, 133-144.
- [35] HajiRassouliha, A., Taberner, A. J., Nash, M. P., & Nielsen, P. M. (2018). Suitability of recent hardware accelerators (DSPs, FPGAs, and GPUs) for computer vision and image processing algorithms. *Signal Processing: Image Communication*, 68, 101-119.
- [36] Rausch, T., Rashed, A., & Dustdar, S. (2021). Optimized container scheduling for data-intensive serverless edge computing. *Future Generation Computer Systems*, 114, 259-271.
- [37] Naz, N., Haseeb Malik, A., Khurshid, A. B., Aziz, F., Alouffi, B., Uddin, M. I., & AlGhamdi, A. (2020). Efficient processing of image processing applications on CPU/GPU. *Mathematical Problems in Engineering*, 1-14.
- [38] Hangün, B., & Eyecioğlu, Ö. (2017). Performance comparison between OpenCV built in CPU and GPU functions on image processing operations. *International Journal of Engineering Science and Application*, 1, 34-41.
- [39] Fan, B., Li, Y., Zhang, R., & Fu, Q. (2020). Review on the technological development and application of UAV systems. *Chinese Journal of Electronics*, 29, 199-207.

SPT-CPT İlişkisinin Yapay Zeka Desteğiyle Çeşitli Zemin Tipleri İçin Araştırılması

Arda Burak EKMEKÇİ 

*1 Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, ŞANLIURFA

(Alınış / Received: 15.04.2023, Kabul / Accepted: 19.06.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 31.08.2023)

Anahtar Kelimeler

Koni Penetrasyon Testi
Standart Penetrasyon Testi
Yapay Zeka
SPT-CPT korelasyonu

Öz: Standart Penetrasyon Testi (SPT) ve Koni Penetrasyon Testi (CPT) zemin araştırmalarında en sık kullanılan yöntemler arasında yer almaktadır. Birçok zemin parametresi SPT ve/veya CPT ile ilişkilendirilmiştir. Bu testlerden herhangi birinin yokluğunda bir diğ erinin kullanılabilmesi için SPT-CPT arasında güvenilir bir korelasyonun elde edilmesi önem arz etmektedir. Bu çalışmada literatürden yararlanılarak çeşitli zemin tipleri için SPT-N verilerine karşılık gelen CPT ile elde edilmiş uç direnci (q_c) değerlerine ulaşılmıştır. SPT-N değerleri ile uç direnci (q_c) verileri arasında anlamlı bir ilişkinin var olup olmadığını araştırmak için varyans analizi gerçekleştirilmiştir. SPT-CPT korelasyonu için yapay sinir ağları ile simüle edilebilir ağlar oluşturularak her zemin tipine özgü yüksek dereceli korelasyon değerlerine sahip ayrı fonksiyonlar elde edilmiştir. Ulaşılan sonuçlar deneysel verilerle ve literatürdeki denklemlerle karşılaştırılmıştır. Böylece farklı zemin tipleri için yapay zeka desteğiyle oluşturulmuş iyi derecede korelasyon değerlerine sahip fonksiyonların yardımıyla SPT ile elde edilen sonuçların CPT ile anlamlı olarak ilişkilendirilmesine olanak sağlanmıştır. Farklı bölgelere ait çok sayıda verinin kullanılması durumunda yapay sinir ağları ile SPT-CPT korelasyonu oluşturmanın başarılı bir yöntem olacağı sonucuna varılmıştır.

Investigation of SPT-CPT Relationship for Various Soil Types with Artificial Intelligence Support

Keywords

Cone Penetration Test
Standard Penetration Test
Artificial intelligence
SPT-CPT correlation

Abstract: Among the most popular techniques for conducting soil investigations are the Standard Penetration Test (SPT) and Cone Penetration Test (CPT). Numerous soil characteristics are linked with SPT and/or CPT. It is essential to obtain a reliable correlation between SPT and CPT to use one of these tests individually. In this study, the tip resistance (q_c) values obtained with CPT corresponding to SPT-N data for various soil types were reached utilizing the literature. Analysis of variance was accomplished to establish whether there was a considerable relationship between SPT-N data and tip resistance (q_c) values. Separate functions with high-order correlation values were obtained for each soil type by creating simulatable networks with artificial neural networks for SPT-CPT correlation. The acquired outcomes were compared with experimental results and equations in the literature. As a result, functions in good correlation values created by the support of artificial intelligence for various soil types have provided the opportunity to correlate SPT and CPT outcomes significantly. It has been concluded that using a large number of data from various locations will enable in an effective way for generating SPT-CPT correlation with artificial neural networks.

*İlgili Yazar, email: ardaburakekmen@harran.edu.tr

1. Giriş

Standart Penetrasyon Testi ve Koni Penetrasyon Testi zeminlerin çeşitli parametreleri hakkında bilgi sahibi olmak amacıyla araştırmalarda en sık kullanılan yöntemler arasında yer almaktadır. Zeminlerin çeşitli parametrelerini tahmin etmek için birçok araştırmacı [1-11] SPT ve CPT değerleri ile ilişkiler kurmuştur. Uzun yıllardır yaygın bir saha testi olarak kullanılan SPT, diğer saha testlerine göre avantajlarından dolayı günümüzde hala popülaritesini sürdürmektedir. Dolayısıyla zemin parametrelerinin diğer arazi testleri yerine SPT verileri ile ilişkilendirilmesi daha yaygındır. SPT, diğer saha testlerine göre dış şartlara daha bağımlı bir testtir. Bu sebeple uygulanan prosedürün doğru bir şekilde işletilmesi önem arz etmektedir. SPT uygulamalarında dış etkenlere bağlı olarak anlamlı sonuçlar elde etmek için sahada ölçülen darbe sayısı dikkate alınan parametrelere göre düzeltilir.

Koni penetrasyon testi, zemin parametrelerinin çeşitli verilerle ilişkilendirilebildiği popüler bir diğer arazi uygulamasıdır. Teknolojinin ilerleyişine bağlı olarak bu test zaman içinde gelişerek günümüzdeki halini almıştır. Güncel CPT uygulamalarında uç direnci (q_c), sürtünme direnci (f_s) ve boşluk suyu basıncı parametrelerinin ölçülmesi mümkün hale gelmiştir. CPT uygulamasının SPT'ye göre çok kanaldan veri sağlama, daha güvenilir veri elde etme ve sürekli bir profil sağlama gibi çeşitli avantajları vardır. Ancak belirtilen özelliklerden dolayı CPT testinin kullanımı artmış olsa da cihazın maliyetinin yüksek olması, cihazı kullanacak uzman operatör yetersizliği, cihazın her yerde bulunmaması gibi nedenlerden dolayı SPT uygulamasının sık kullanımı günümüzde devam etmektedir [12]. Bu kapsamda SPT ve CPT verilerinin birbirlerine güvenli korelasyonlar ile dönüşümlerinin yapılabilmesi önem arz etmektedir. SPT ve CPT değerlerini birbirine dönüştürmek amacıyla literatürde çeşitli çalışmalar yer almıştır [12-20]. Bu kapsamda kurulan ilişkilerin hata paylarının düşük ve korelasyon katsayılarının yüksek olması iyi tahminler elde etmek için önemli bir noktadır. Çeşitli yöntemlerle elde edilebilen tahmin fonksiyonlarının iyi derecede korelasyonlarla oluşturulması için birçok faktör duruma etki etmektedir. Ancak bu faktörlerden en önemlisi anlamlı derecedeki veri sayısıdır. Anlamlı veri sayısı arttıkça arazideki duruma daha yakın sonuçların elde edilmesi mümkün olmaktadır. Bu çalışma kapsamındaki araştırmalarda verileri dikkate alınan Jarushi ve ark. [20], SPT-N değerlerine bağlı olarak CPT ile elde edilen q_c değerlerini tahmin ettikleri çalışmalarında birçok zemin tipi için çok sayıda veri kullanarak regresyon analizleri gerçekleştirmişlerdir. SPT ve CPT verilerinin farklı noktalardan alınması iyi derecede korelasyonların elde edilmesinde önemlidir.

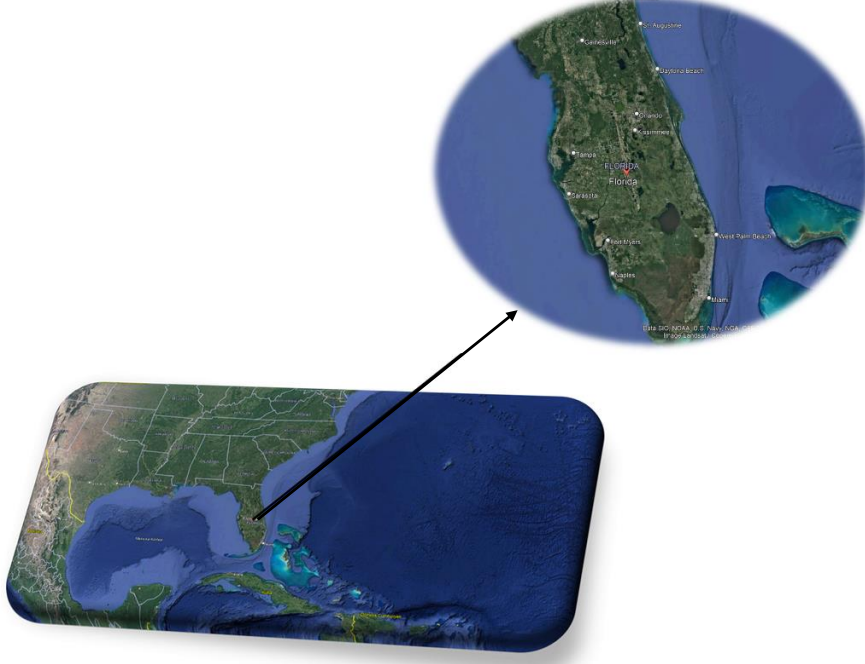
Teknolojinin gelişimine bağlı olarak bilgisayarların bellek ve işlemci kapasitelerinin gelişmesiyle veri tahmin yöntemleri için yapay sinir ağlarının kullanımı popülerleşmiştir. Yapay zekanın çalışma sistemi insan beyninin bilgi işleme yöntemine benzer niteliktedir. Yapay sinir ağları sistemlerinde yer alan nöronlar birbirlerine bağlanarak öğrenme özelliğine sahip yapılar oluştururlar [7]. Bu sistemde yer alan her nöron kendisine bağlı nöronlara gönderilen sinyaller sayesinde iletişim sağlar. Böylece katmanlar arası bağlantının sağlanması mümkün hale gelir. Yapay zeka sistemlerinde veriler yeterli düzeyde eğitilerek çıktı katmanının veri tahmini yapmasını sağlar. Bu bağlamda yapay sinir ağları kullanılarak iyi derecede veri tahminleri yapılabilmesi için yeterli verinin bulunması önemli bir etkidir. Literatürde geoteknik mühendisliği kapsamında yapay sinir ağlarının kullanıldığı çalışmalar mevcuttur [21-27]. Bu çalışmalar yapay zeka uygulamalarının geoteknik mühendisliği kapsamında işlevsel olduğunu göstermektedir. Ayrıca inşaat mühendisliğinin diğer alanlarında da yapay zeka destekli çalışmalar yürütülmektedir [28-29].

Bu çalışma kapsamında, literatürde yer alan deneysel verilerden yararlanılarak farklı noktalardaki çok sayıda düzeltilmemiş SPT-N verisine karşılık gelen çeşitli zeminlerin CPT uç direnci (q_c) değerleri elde edilmiştir. SPT ile CPT verileri arasında tahmin fonksiyonları oluşturmak için bu veriler kullanılarak yapay sinir ağları ile simüle edilebilen ağlar oluşturulmuş ve elde edilen korelasyonlar değerlendirilmiştir. Yapay sinir ağı oluşturmada kullanılan SPT ile CPT verilerinin arasında anlamlı bir ilişkinin var olup olmadığını araştırmak için varyans analizi gerçekleştirilmiştir. CPT uç direnci (q_c) değerlerini SPT verileri aracılığıyla tahmin edebilmek için yapay sinir ağları kullanılarak simülasyonlar yapılmıştır. Yapay sinir ağları ile elde edilen sonuçlar, literatürdeki denklemler ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

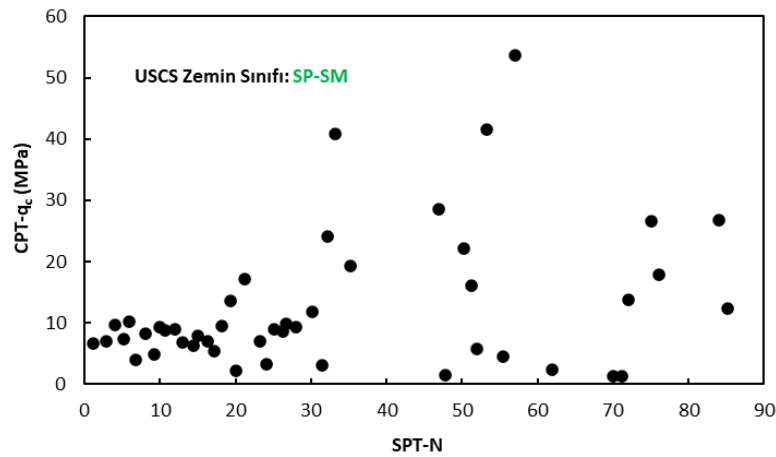
2.1. Simülasyonlarda kullanılan verilerle ilgili detaylar

Bu çalışma kapsamında SPT-N verilerine karşılık gelen çeşitli zeminlerin CPT uç direnci (q_c) değerlerinin tahmini için iyi derecede korelasyon katsayılarına sahip ağlar oluşturabilmek özelliğinden dolayı geoteknik mühendisliğinde başarılı simülasyon örnekleri bulunan yapay sinir ağları kullanılmıştır. Bu çalışmada yapay sinir ağlarında simüle edilmek üzere seçilen veri seti, Jarushi ve ark. [20] tarafından sunulan çalışmada yer alan farklı zemin tipleri için SPT-N verilerine karşılık deneysel olarak elde edilmiş CPT uç direnci (q_c) değerlerinden oluşmuştur. Şekil 1'de Jarushi ve ark. [20] tarafından çalışılan bölge (Florida, Amerika Birleşik Devletleri) gösterilmiştir.



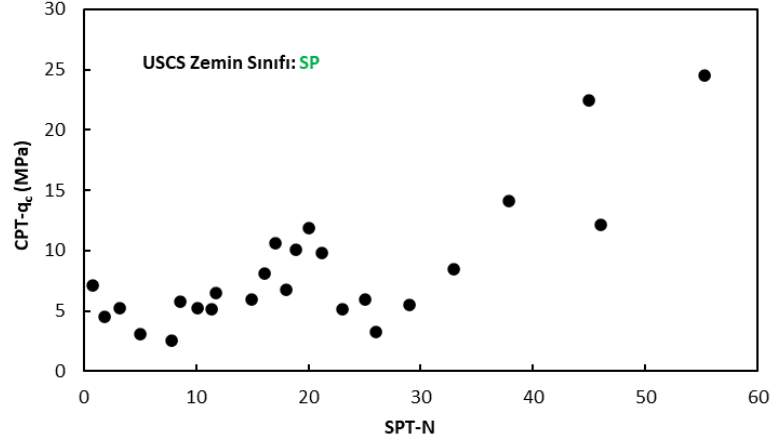
Şekil 1. Simülasyonlarda kullanılan verilerin bulunduğu bölge

Jarushi ve ark. [20], dikkate alınarak altı farklı zemin tipi için deneysel veriler değerlendirmeye alınmıştır. Şekil 2'de USCS sistemine göre SP-SM sınıfında yer alan zemin için fonksiyon oluşturmada kullanılan deneysel veriler [20] sunulmuştur.



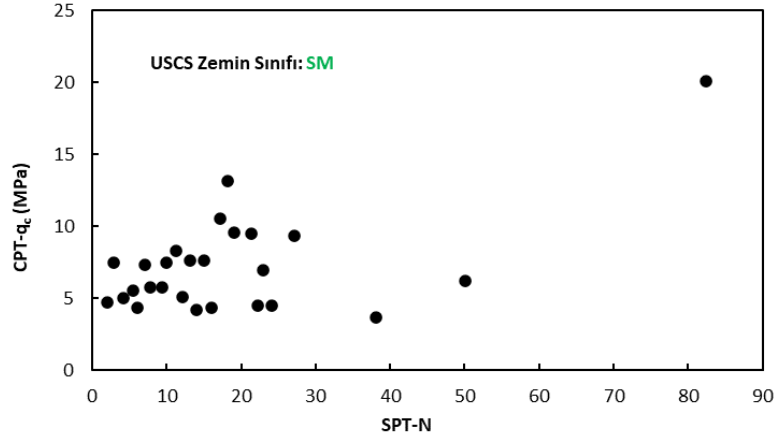
Şekil 2. USCS sistemine göre SP-SM sınıfında yer alan zemin için fonksiyon oluşturmada kullanılan deneysel veriler [20]

Şekil 3'te USCS sistemine göre SP sınıfında yer alan zemin için fonksiyon oluşturmada kullanılan deneysel veriler [20] sunulmuştur.



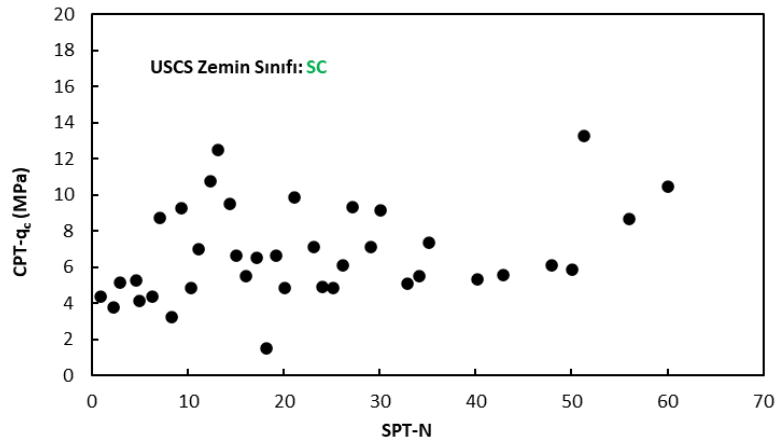
Şekil 3. USCS sistemine göre SP sınıfında yer alan zemin için fonksiyon oluşturmada kullanılan deneysel veriler [20]

Şekil 4'te USCS sistemine göre SM sınıfında yer alan zemin için fonksiyon oluşturmada kullanılan deneysel veriler [20] sunulmuştur.



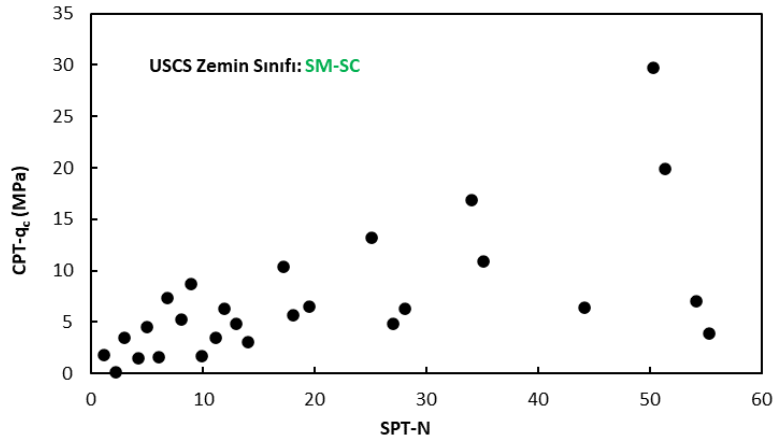
Şekil 4. USCS sistemine göre SM sınıfında yer alan zemin için fonksiyon oluşturmada kullanılan deneysel veriler [20]

Şekil 5'te USCS sistemine göre SC sınıfında yer alan zemin için fonksiyon oluşturmada kullanılan deneysel veriler [20] sunulmuştur.



Şekil 5. USCS sistemine göre SC sınıfında yer alan zemin için fonksiyon oluşturmada kullanılan deneysel veriler [20]

Şekil 6'da USCS sistemine göre SM-SC sınıfında yer alan zemin için fonksiyon oluşturmada kullanılan deneysel veriler [20] sunulmuştur.



Şekil 6. USCS sistemine göre SM-SC sınıfında yer alan zemin için fonksiyon oluşturmada kullanılan deneysel veriler [20]

Şekil 2-6'da sunulan veriler için yapay sinir ağları kullanarak fonksiyon oluşturmada önce verilerin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadıklarını incelemek amacıyla tüm veri setlerine varyans analizi yapılmıştır.

2.2. Varyans Analizi

SPT verilerinin değişiminin CPT uç direnci (q_c) değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlılığını araştırmak için ilgili verilerle varyans analizi yapılmıştır. Varyans analizinde Genelleştirilmiş Doğrusal Model kullanılmıştır. Bu çalışmada düzeltilmemiş SPT-N değerleri bağımsız değişken olarak işleme alınırken CPT uç direnci (q_c) değerleri ise bağımlı değişken olarak belirlenmiştir. Gerçekleştirilen varyans analizi çalışmasının sonuçları Bölüm 3.1'de sunulmuş ve değerlendirilmiştir.

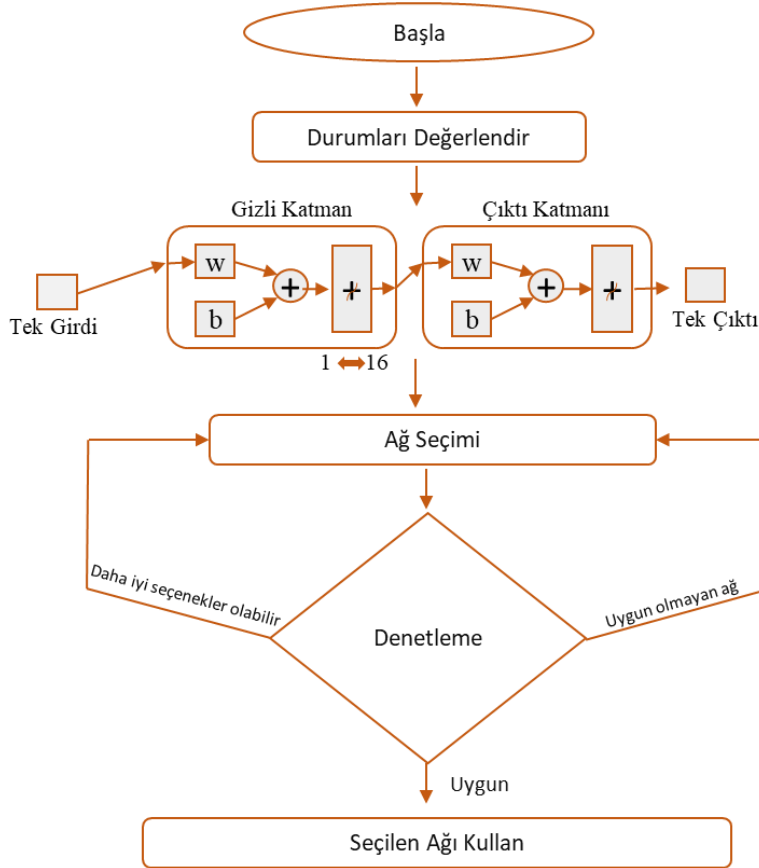
2.3. Yapay Sinir Ağları ile Modelleme ve Analiz

Yapay zeka günümüzde bir bilim alanı olarak kabul edilmektedir ve yapay zeka sistemlerinde makinelerin yaratıcı davranarak çözümler üretmesi hedeflenmektedir. Yapay zekanın bir ürünü olan yapay sinir ağları ile veri tahmin modelleri oluşturmak için ağı eğitebilecek düzeyde yeterli veri sayısına ulaşmak gerekmektedir. Kullanılan veri ve değişken sayısının artması işlem süresinin artmasına neden olmaktadır. Bu kapsamda veri seti ve değişken sayısı arttıkça gelişmiş bilgisayar sistemlerine duyulan ihtiyaç fazlalaşmaktadır. Günümüzdeki bilgisayarların bellek ve işlemci sistemleri yapay zeka kullanımı için ihtiyaç duyulan sistem gereksinimlerini büyük oranda karşıladığından mühendislik problemlerinde yapay zeka araçlarının kullanımı artış göstermiştir. Yapay sinir ağları ile oluşturulan ağlar yeni ilişkiler kurma ve öğrenme kabiliyetine sahiptirler. Bu sistemde girdi olarak sunulan veriler eğitilir ve oluşturulan simülasyonda çıktılar için tahmin yapılması sağlanır. Standart eğri uydurma işlevlerine kıyasla yapay sinir ağları ile iyi derecede tahmin fonksiyonları oluşturmak mümkündür. Bu çalışmada SPT-N verileri ile CPT uç direnci (q_c) değerleri arasında yapay sinir ağları kullanılarak tahmin fonksiyonları Matlab yazılımında [30] üretilen kodlama aracılığıyla oluşturulmuştur. Tablo 1'de bu çalışma kapsamındaki tüm yapay sinir ağı modellerinde kullanılan seçenekler sunulmuştur.

Tablo 1. Bu çalışma kapsamındaki tüm yapay sinir ağı modellerinde kullanılan seçenekler

Eğitim, test ve validasyon verilerinin seçimi	Rastgele
Eğitim, test ve validasyon verilerinin yüzdesel dağılışı	%70-%15-%15
Gizli katman sayısı	1
Nöron denemeleri	1 ile 16 arası
Performans fonksiyonu	Ortalama karesel hata
İterasyon Sayısı	Otomatik seçim
Seçilen yöntem	Bayesian Regularization

Yapay sinir ağlarında girdi olarak düzeltilmemiş SPT-N değerleri, çıktı olarak CPT uç direnci (q_c) kullanılmıştır. Verilerin %70'i eğitim için ayrılırken %15'i test ve %15'i ise validasyon değerleri olarak rastgele bir şekilde ayrılmıştır. Rastgele ayrılan %70'lik eğitim setinde iyi tahminler yapılabilmesi için seçilen veriler ile yapay sinir ağları eğitilmiştir. Sistemin belirtilen kısıtlar dahilinde en iyi performansın olduğu noktayı yakalaması için otomatik iterasyon tercih edilmiştir. Validasyon verileri ile eğitim esnasında model performansı doğrulanmış ve eğitimin doğru şekilde gidip gitmediği belirlenmiştir. Böylece hatalı veri uydurma işlevi önlenmiştir. Test seti ise validasyondan farklı bir biçimde eğitim işlemi tamamlandıktan sonra modeli test etmek için kullanılmış ve modelin ne kadar iyi performans sergilediği araştırılmıştır. Bu çalışma kapsamındaki tüm yapay sinir ağı modellerinde regresyon fonksiyonunun oluşturulması için iyi tahminler yapabilen Bayesian Regularization yöntemi kullanılmıştır. Değerlendirilen parametreler bir girdi ve bir çıktıdan oluştuğu için tek gizli katman seçilmiş olup nöron sayısı 1 ile 16 arasında değiştirilmiştir. Performans fonksiyonu olarak ortalama karesel hata seçilmiştir. Şekil 7'de bu çalışma kapsamındaki tüm yapay sinir ağı modellerinde kullanılan algoritma sunulmuştur.



Şekil 7. Bu çalışma kapsamındaki tüm yapay sinir ağı modellerinde kullanılan algoritma

Kullanılan algoritmada ağ seçimi yapılırken en uygun ağ elde edilene kadar döngü devam edecek şekilde bir yapı oluşturulmuştur. Varyans analizi sonucunda bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında anlamlı bir ilişki bulunmuştur. Bu bağlamda anlamlı bulunan veriler yapay sinir ağları çözüm algoritmasına aktarılmıştır. Şekil 7'de gösterilen w , tüm ağırlıkları ve b eğilimleri ifade etmektedir. Her bir veri setini kapsayan her analiz için 16 farklı kombinasyon değerlendirilmiş ve istatistiksel anlamda en iyi sonucu veren kombinasyon ilgili algoritma tarafından seçilmiştir.

3. Bulgular

Çalışmanın Materyal ve Metot kısmında yer alan analizlerin sonuçları aşağıdaki alt bölümlerde sunulmuştur.

3.1. Varyans Analizi

Tablo 2’de bu çalışma kapsamında yürütülen tüm varyans analizlerinin sonuçları sunulmuştur.

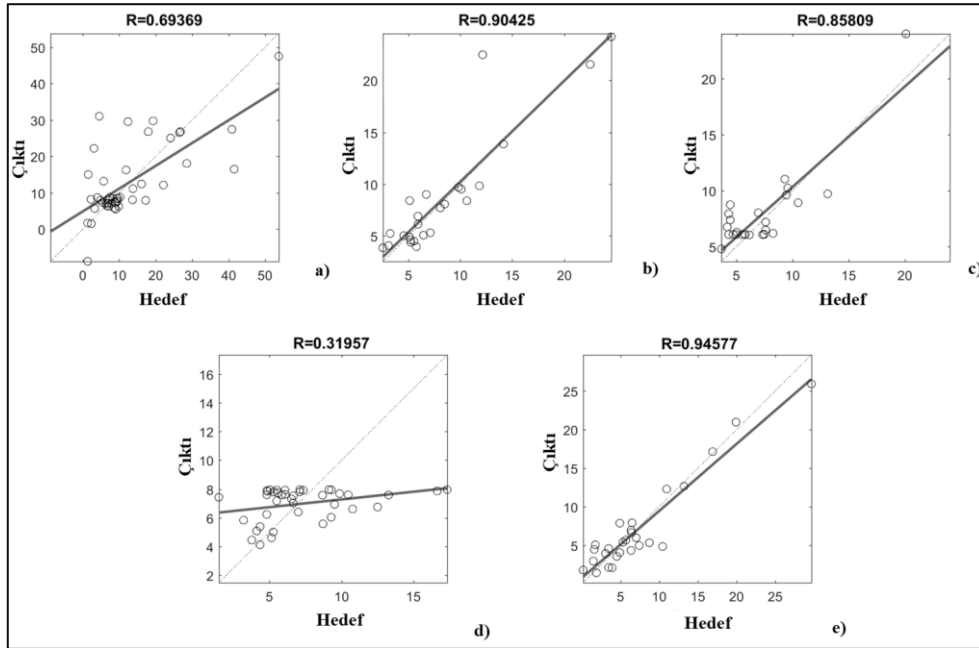
Tablo 2. Varyans analizi sonuçları

Zemin Sınıfı	Bağımsız Değişken	Bağımlı Değişken	Parametreler					Anlamlılık
			Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kare	F	P-değeri	
SP-SM	SPT-N	q _c	1	668.84	668.84	5.92	0.019	Evet
		Hata	45	5081.49	112.92			
SP	SPT-N	q _c	1	427.03	427.03	35.15	4.8x10 ⁻⁰⁶	Evet
		Hata	23	279.39	12.14			
SM	SPT-N	q _c	1	109.23	109.23	13.33	0.0013	Evet
		Hata	24	196.59	8.19			
SC	SPT-N	q _c	1	45.39	45.39	4.29	0.045	Evet
		Hata	38	401.55	10.56			
SM-SC	SPT-N	q _c	1	400.14	400.14	14.66	0.00076	Evet
		Hata	25	681.99	27.27			

%95 güven aralığında gerçekleştirilen varyans analizleri sonucunda P-değerleri tüm analizlerde 0.05’ten küçük olarak elde edilmiştir. Böylece Tablo 2’de sunulan SPT-N değerine bağlı olan CPT- q_c değerinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu belirlenmiştir. Tüm zemin sınıfları için anlamlı ilişkiler elde edildiğinden tüm deneysel veriler yapay sinir ağlarında model oluşturmak için kullanılmıştır.

3.2. Yapay Sinir Ağları ile Gerçekleştirilen Simülasyonun Sonuçları

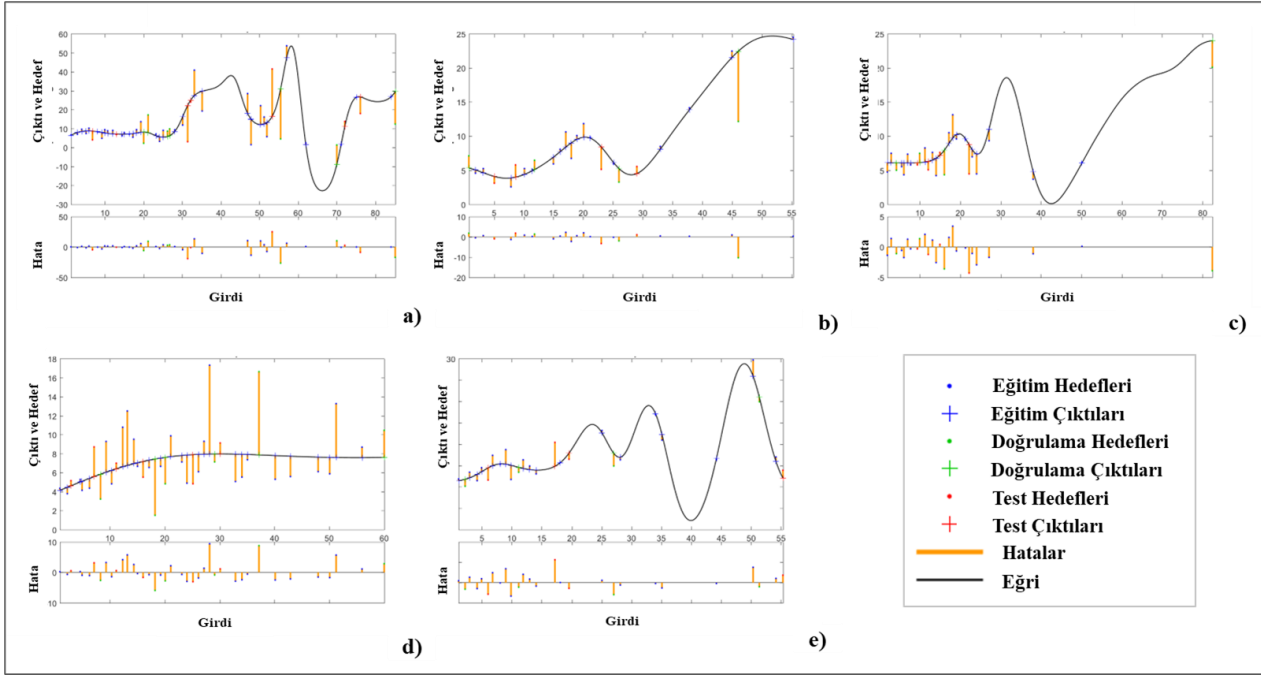
Şekil 7’de gösterilen algoritma kapsamında yapay sinir ağları kullanılarak tüm veri setlerinde 16 farklı nöron kombinasyonu ile oluşturulan ağlar arasından istatistiksel olarak en iyi sonucu veren seçenekler seçilmiştir. Bayesian Regularization yöntemiyle oluşturulan yapay sinir ağlarının simüle edilmesiyle veri tahminleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 8’de çalışılan tüm veriler için elde edilmiş eğriler ve R değerleri sunulmuştur.



Şekil 8. Yapay sinir ağları ile oluşturulan regresyon fonksiyonlarının çeşitli zemin tipleri için istatistiksel verileri;

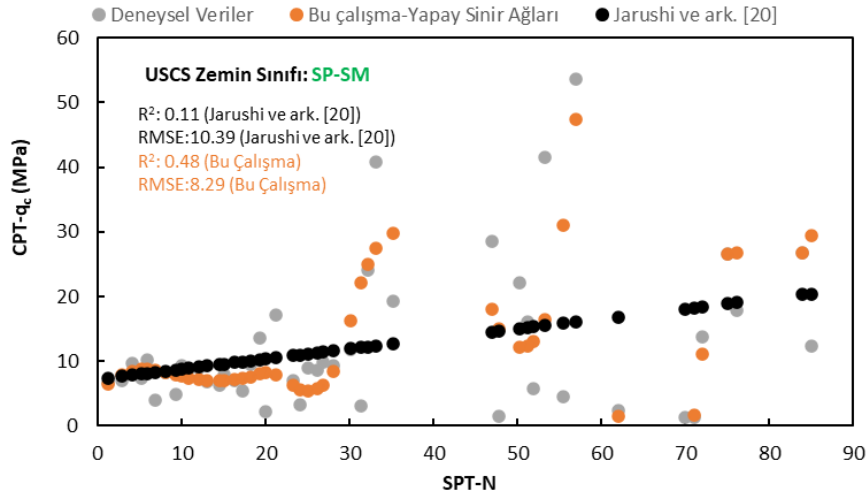
a) SP-SM, b) SP, c) SM, d) SC, e) SM-SC

Şekil 9'da çalışılan tüm zemin tipleri için seçilen tüm ağların fonksiyon eğri uydurma ve hata durumları gösterilmiştir. Hata oranlarının eğitim, test ve doğrulama (validasyon) verileri için düşük ve birbirlerine yakın olması elde edilen fonksiyonların geçerliliğini göstermektedir.



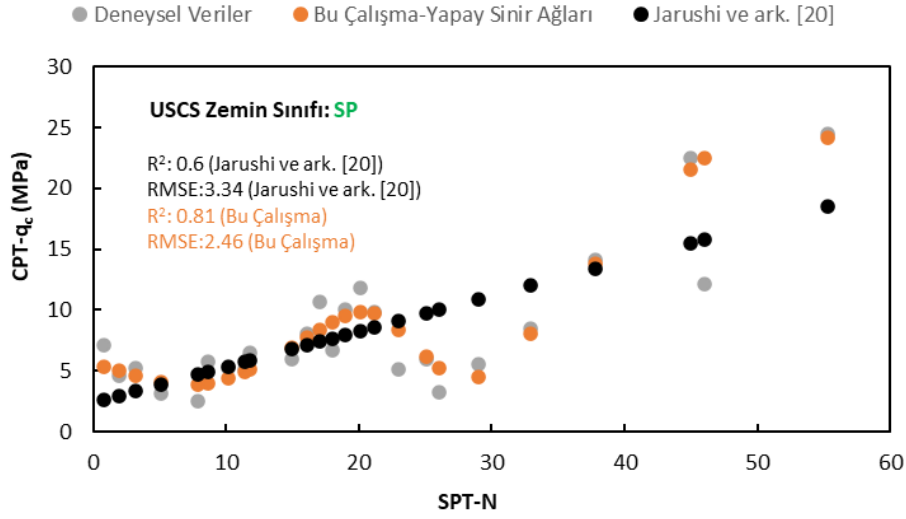
Şekil 9. Çalışılan tüm zemin tipleri için seçilen tüm ağların fonksiyon eğri uydurma ve hata durumları

Şekil 10'da SP-SM zemin sınıfı için SPT-N değerlerine karşılık gelen CPT- q_c deneysel verileri, Jarushi ve ark. [20] tarafından oluşturulan denklem ile elde edilen sonuçlar ve bu çalışma kapsamında yapay sinir ağları kullanarak elde edilen değerlerin karşılaştırılması sunulmuştur.



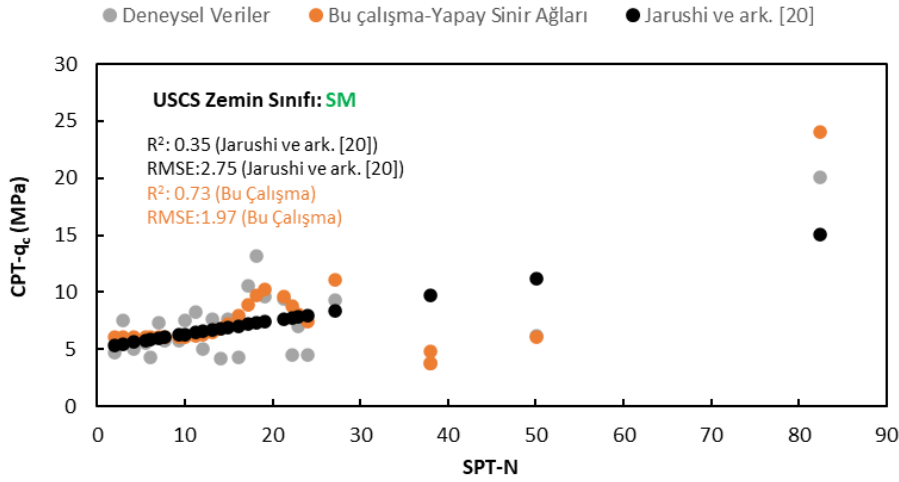
Şekil 10. SP-SM zemin sınıfı için SPT-N değerlerine karşılık gelen CPT- q_c deneysel verileri, Jarushi ve ark. [20] tarafından oluşturulan denklem ile elde edilen sonuçlar ve bu çalışma kapsamında yapay sinir ağları kullanarak elde edilen değerlerin karşılaştırılması

Şekil 11'de SP zemin sınıfı için SPT-N değerlerine karşılık gelen CPT- q_c deneysel verileri, Jarushi ve ark. [20] tarafından oluşturulan denklem ile elde edilen sonuçlar ve bu çalışma kapsamında yapay sinir ağları kullanarak elde edilen değerlerin karşılaştırılması sunulmuştur.



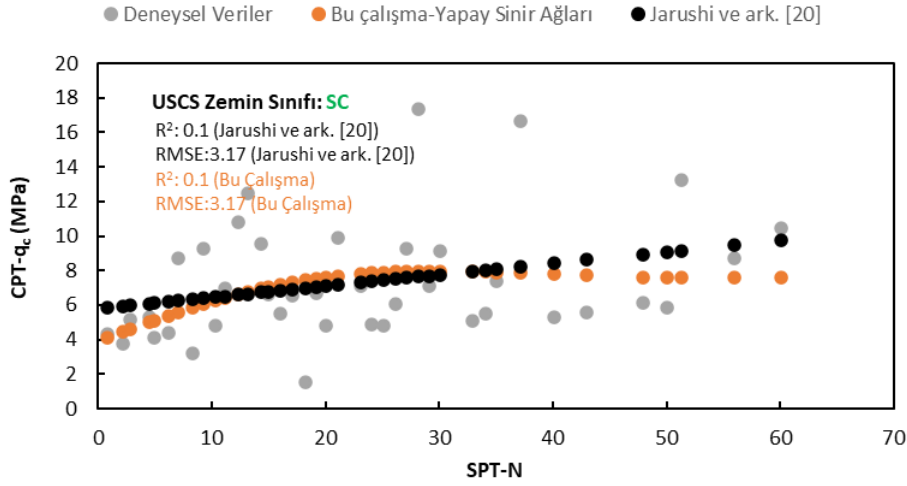
Şekil 11. SP zemin sınıfı için SPT-N değerlerine karşılık gelen CPT- q_c deneysel verileri, Jarushi ve ark. [20] tarafından oluşturulan denklem ile elde edilen sonuçlar ve bu çalışma kapsamında yapay sinir ağları kullanarak elde edilen değerlerin karşılaştırılması

Şekil 12’de SM zemin sınıfı için SPT-N değerlerine karşılık gelen CPT- q_c deneysel verileri, Jarushi ve ark. [20] tarafından oluşturulan denklem ile elde edilen sonuçlar ve bu çalışma kapsamında yapay sinir ağları kullanarak elde edilen değerlerin karşılaştırılması sunulmuştur.



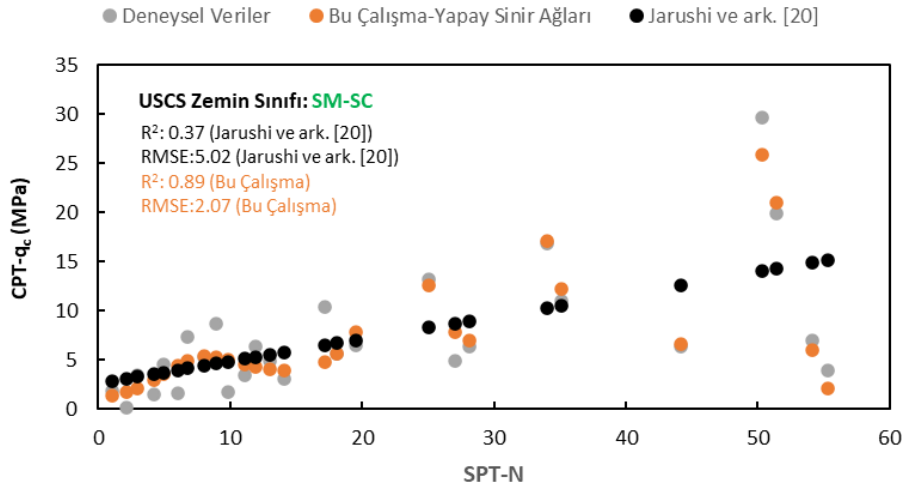
Şekil 12. SM zemin sınıfı için SPT-N değerlerine karşılık gelen CPT- q_c deneysel verileri, Jarushi ve ark. [20] tarafından oluşturulan denklem ile elde edilen sonuçlar ve bu çalışma kapsamında yapay sinir ağları kullanarak elde edilen değerlerin karşılaştırılması

Şekil 13’te SC zemin sınıfı için SPT-N değerlerine karşılık gelen CPT- q_c deneysel verileri, Jarushi ve ark. [20] tarafından oluşturulan denklem ile elde edilen sonuçlar ve bu çalışma kapsamında yapay sinir ağları kullanarak elde edilen değerlerin karşılaştırılması sunulmuştur.



Şekil 13. SC zemin sınıfı için SPT-N değerlerine karşılık gelen CPT- q_c deneysel verileri, Jarushi ve ark. [20] tarafından oluşturulan denklem ile elde edilen sonuçlar ve bu çalışma kapsamında yapay sinir ağları kullanarak elde edilen değerlerin karşılaştırılması

Şekil 14'te SM-SC zemin sınıfı için SPT-N değerlerine karşılık gelen CPT- q_c deneysel verileri, Jarushi ve ark. [20] tarafından oluşturulan denklem ile elde edilen sonuçlar ve bu çalışma kapsamında yapay sinir ağları kullanarak elde edilen değerlerin karşılaştırılması sunulmuştur.



Şekil 14. SM-SC zemin sınıfı için SPT-N değerlerine karşılık gelen CPT- q_c deneysel verileri, Jarushi ve ark. [20] tarafından oluşturulan denklem ile elde edilen sonuçlar ve bu çalışma kapsamında yapay sinir ağları kullanarak elde edilen değerlerin karşılaştırılması

Veri tahmini için kullanılan yöntemlerin tahmin başarısını karşılaştırmak için Şekil 10-14'te sunulan grafikler çizilmiştir. Elde edilen grafikler için korelasyon katsayıları (R^2) ve ortalama karesel hataların kökleri (RMSE) hesaplanmıştır. İlgili grafiklerde görüldüğü üzere bu çalışma kapsamında yapay sinir ağları kullanarak yapılan veri tahminleri deneysel verilere oldukça iyi düzeyde yaklaşmış olup hiçbir analizde Jarushi ve ark. [20] tarafından yapılan veri tahmini istatistiksel başarısının altında kalmamıştır. Beş farklı zemin tipi için yapılan analizlerin dördünde Jarushi ve ark. [20] tarafından yapılan tahminlere göre çok iyi düzeyde korelasyon katsayısı elde edilmiştir. SC zemin tipi için ise her iki yöntemin tahmin başarısı neredeyse aynıdır. Bu çalışma kapsamında yapay sinir ağları ile deneysel verilere en çok yaklaşılan en iyi tahminler ise SM-SC zemin tipinde gerçekleşmiştir. Tablo 3'te tüm zemin tipleri için bu çalışma kapsamındaki yapay sinir ağları ile oluşturulan fonksiyonların ve Jarushi ve ark. [20] tarafından yapılan veri tahminlerinin istatistiksel değerlendirmeleri sunulmuştur.

Tablo 3. Tüm zemin tipleri için bu çalışma kapsamındaki yapay sinir ağları ile oluşturulan fonksiyonların ve Jarushi ve ark. [20] tarafından yapılan veri tahminlerinin istatistiksel değerlendirmeleri

Zemin Sınıfı	R ² : (Jarushi ve ark. [20])	R ² : (Bu Çalışma)	RMSE: (Jarushi ve ark. [20])	RMSE: (Bu Çalışma)
SP-SM	0.11	0.48	10.39	8.29
SP	0.60	0.81	3.34	2.46
SM	0.35	0.73	2.75	1.97
SC	0.10	0.10	3.17	3.17
SM-SC	0.37	0.89	5.02	2.07
Ortalama	0.30	0.60	4.93	3.59

Tablo 3'te görülebileceği üzere bu çalışma kapsamında yapay sinir ağları simülasyonları ile tüm zemin tipleri için elde edilen ortalama R² değeri 0.6 iken Jarushi ve ark. [20] tarafından yapılan veri tahminlerinde ortalama R² değeri 0.3'tür. Benzer şekilde hatayı tanımlayan RMSE değerlerinde bu çalışma kapsamında yapay sinir ağları simülasyonları ile tüm zemin tipleri için elde edilen ortalama değer 3.59 iken Jarushi ve ark. [20] tarafından yapılan veri tahminlerinde ortalama değer 4.93'tür. İstatistiksel veriler hem ortalama bazlı hem de zemin tipi bazlı ayrı ayrı değerlendirildiğinde bu çalışma kapsamında yapay sinir ağları ile yapılan veri tahminlerinin diğer yöntemlere göre çok daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

4. Tartışma ve Sonuç

Zemin mekaniği kapsamındaki çalışmalarda birçok zemin parametresinin SPT ve CPT ile ilişkilendirildiği bilinmektedir. SPT-CPT arasında iyi derecede bir korelasyonun elde edilmesi belirtilen testlerden herhangi birinin uygulanmaması durumunda diğer testin kullanılabilmesi adına gerekli bir durumdur. Bu çalışma kapsamında SPT-CPT arasında iyi derecede bir korelasyon elde edebilmek için literatürden yararlanılarak çeşitli zemin tipleri için deneysel verilere ulaşılmıştır. Ulaşılan deneysel verilerin anlamlılığı istatistiksel olarak belirlendikten sonra yapay sinir ağları ile SPT-CPT ilişkisine ait yüksek dereceli korelasyonlarda her bir veri seti için ayrı fonksiyonlar elde edilmiştir. Koni Penetrasyon Testi ile elde edilen q_c değerleri Standart Penetrasyon Testi verilerine bağlı olarak yapay sinir ağları ve literatürde sunulan denklemler kullanılarak hesaplanmıştır. Her iki yöntem birbiri ile kıyaslanmış ve istatistiksel olarak en iyi sonucu veren yöntem belirlenmiştir. Veri tahmininde kullanılan yöntemleri karşılaştırmak için deneysel verileri ve her iki yöntemin de tahmin sonuçlarını içeren grafiksel çözümler yapılmıştır. Oluşturulan grafiklerde tüm yöntemler deneysel verilerle kıyaslanarak korelasyon katsayıları (R²) ve ortalama karesel hataların kökleri (RMSE) hesaplanmıştır. Elde edilen grafiklerden ve istatistiksel çözümlerden bu çalışma kapsamındaki yapay sinir ağları ile yapılan veri tahminlerinin deneysel verilere iyi düzeyde yaklaştığı olduğu ve hiçbir analizde dikkate alınan literatürdeki veri tahmin yönteminin istatistiksel başarısının altında kalmadığı belirlenmiştir. SP-SM, SP, SM, SC, SM-SC sınıflarındaki farklı zemin tipleri için yapılan analizlerin dördünde dikkate alınan literatürdeki veri tahmin yöntemine göre çok iyi düzeyde korelasyon katsayılarına ve düşük hata oranlarına ulaşılmıştır. Yapay sinir ağlarıyla yapılan tahminlerde SC zemin tipi için diğer yöntemle oldukça benzer korelasyon katsayıları ve hata oranları elde edilirken bu çalışma kapsamındaki simülasyonlarda deneysel verilere en çok yaklaşılan SM-SC zemin tipinde gerçekleştirilen analizler olmuştur. Dikkate alınan literatürdeki tahmin yöntemi ile gerçekleştirilen veri tahminlerinde ortalama R² değeri 0.3 iken yapay sinir ağları simülasyonları kullanılarak bu çalışma kapsamında dikkate alınan tüm zemin sınıfları için elde edilen ortalama R² değeri 0.6'dır. Ayrıca hata göstergesi olan RMSE değerlerinde dikkate alınan literatürdeki tahmin yöntemi ile yapılan veri tahminlerinde ortalama değer 4.93 iken bu çalışma kapsamında yapay sinir ağları simülasyonları ile tüm zemin tipleri için elde edilen ortalama değer 3.59 olmuştur. İstatistiksel veriler açısından hem zemin tipine hem de ortalama değerlere göre ayrı ayrı değerlendirme yapıldığında bu çalışma kapsamında yapay sinir ağları ile yapılan veri tahminlerinin literatürde yer alan yöntemlere göre çok daha anlamlı sonuçlar verdiği görülmüştür. Böylece yapay sinir ağları ile elde edilen istatistiksel başarı dikkate alındığında çeşitli zemin sınıfları için yapay zeka ile oluşturulmuş iyi derecede korelasyon değerlerine sahip fonksiyonlar aracılığıyla SPT ile elde edilen sonuçların CPT ile anlamlı olarak ilişkilendirilmesine olanak sağlandığı söylenebilir. Bu kapsamda farklı çalışma sahalarına ait çok sayıda veri setinin kullanılması durumunda yapay sinir ağları ile SPT-CPT korelasyonu elde etmenin başarılı bir yöntem olacağı sonucuna varılmıştır.

Kaynakça

- [1] Hettiarachchi, H., & Brown, T. (2009). Use of SPT blow counts to estimate shear strength properties of soils: energy balance approach. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(6), 830-834.
- [2] Zhou, H., Wotherspoon, L. M., Hayden, C. P., Stolte, A. C., & McGann, C. R. (2023). Applicability of existing CPT-Vs correlations to shallow Holocene Christchurch soils based on direct Push crosshole testing. *Engineering Geology*, 313, 106927.
- [3] Anagnostopoulos, A., Koukis, G., Sabatakakis, N., & Tsiambaos, G. (2003). Empirical correlations of soil parameters based on cone penetration tests (CPT) for Greek soils. *Geotechnical & geological engineering*, 21, 377-387.
- [4] Jianguo, C. H. E. N. G. (2012). Correlation Analysis of SPT \sqrt{N} Values and Cohesion σ_c and International Angle of a Clay. *Soil Engineering and Foundation*, 26(4), 91.
- [5] Lu, Y. C., Liu, L. W., Khoshnevisan, S., Ku, C. S., Juang, C. H., & Xiao, S. H. (2022). A new approach to constructing SPT-CPT correlation for sandy soils. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 1-17.
- [6] Kumar, R., Bhargava, K., & Choudhury, D. (2016). Estimation of engineering properties of soils from field SPT using random number generation. *INAE Letters*, 1(3), 77-84.
- [7] Ekmen, A. B. (2023). Evaluation of SPT-N values and internal friction angle correlation using artificial intelligence methods in granular soils. *Soil Research*.
- [8] Cubrinovski, M., & Ishihara, K. (1999). Empirical correlation between SPT N-value and relative density for sandy soils. *Soils and Foundations*, 39(5), 61-71.
- [9] S Dalai, S., & Patra, C. (2021). Prediction of Angle of Internal Friction Based on SPT N Values. In *Proceedings of the Indian Geotechnical Conference 2019* (pp. 471-477). Springer, Singapore.
- [10] Hatta, K. A., & Syed Osman, S. B. A. (2015). Correlation of electrical resistivity and SPT-N value from standard penetration test (SPT) of sandy soil. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 785, pp. 702-706). Trans Tech Publications Ltd.
- [11] Poor, M. M., Azarafza, M., & Derakhshani, R. (2023). A correlation based on pressuremeter, SPT and CPT tests for characterizing of coastal alluvium: A study for phase 14 South Pars, Iran. *MethodsX*, 10, 101938.
- [12] Bol, E. (2023). A new approach to the correlation of SPT-CPT depending on the soil behavior type index. *Engineering Geology*, 106996.
- [13] Faivre, Y., Mirzaghobanali, A., Nourizadeh, H., Shokri, B. J., McDougall, K., & Aziz, N. (2023). SPT-CPT correlation in Southeast Queensland, Australia.
- [14] Robertson, P. K., Campanella, R. G., & Wightman, A. (1983). Spt-Cpt Correlations. *Journal of Geotechnical Engineering*, 109(11), 1449-1459.
- [15] Chin, C. T., Duann, S. W., & Kao, T. C. (1990). SPT-CPT correlations for granular soils. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts* (Vol. 27, No. 2, pp. A91-A91). Elsevier Science.
- [16] Akca, N. (2003). Correlation of SPT-CPT data from the United Arab Emirates. *Engineering Geology*, 67(3-4), 219-231.
- [17] Lu, Y. C., Liu, L. W., Khoshnevisan, S., Ku, C. S., Juang, C. H., & Xiao, S. H. (2022). A new approach to constructing SPT-CPT correlation for sandy soils. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 1-17.
- [18] Kruizinga, J. (2021, February). SPT-CPT correlations. In *Penetration Testing* (pp. 91-94). Routledge.

- [19] Zhou, H., Wotherspoon, L. M., Hayden, C. P., McGann, C. R., Stolte, A., & Haycock, I. (2021). Assessment of Existing SPT-CPT Correlations Using a New Zealand Database. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 147(11), 04021131.
- [20] Jarushi, F., AlKaabim, S., & Cosentino, P. (2015). A new correlation between SPT and CPT for various soils. *International Journal of Geological and Environmental Engineering*, 9(2), 101-107.
- [21] Park, H. I., & Lee, S. R. (2011). Evaluation of the compression index of soils using an artificial neural network. *Computers and Geotechnics*, 38(4), 472-481.
- [22] Lai, J., Qiu, J., Feng, Z., Chen, J., & Fan, H. (2016). Prediction of soil deformation in tunnelling using artificial neural networks. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2016.
- [23] Luat, N. V., Lee, K., & Thai, D. K. (2020). Application of artificial neural networks in settlement prediction of shallow foundations on sandy soils. *Geomechanics and Engineering*, 20(5), 385-397.
- [24] Amini, O., Khoshghalb, A., & Etemadifar, M. (2021). Investigation of the geotechnical properties and estimation of the relative density from the standard penetration test in sandy
- [25] Zakharov, A., Shenkman, R., Ofrikhter, I., & Ponomaryov, A. (2022). Estimation of soil properties by an artificial neural network. *Magazine of Civil Engineering*, 110(2), 11011.
- [26] Shahin, M. A., Jaksa, M. B., & Maier, H. R. (2001). Artificial neural network applications in geotechnical engineering. *Australian geomechanics*, 36(1), 49-62.
- [27] Ekmen, A. B., & Avcı, Y. (2023). Artificial Intelligence-Assisted Optimization of Tunnel Support Systems Based on the Multiple Three-Dimensional Finite Element Analyses Considering the Excavation Stages. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 47(3), 1725-1747.
- [28] Işık, E., Ademović, N., Harirchian, E., Avcil, F., Büyüksaraç, A., Hadzima-Nyarko, M., ... & Antep, B. (2023). Determination of Natural Fundamental Period of Minarets by Using Artificial Neural Network and of the Impact of Different Materials on Their Seismic Vulnerability. *Applied Sciences*, 13(2), 809.
- [29] Bülbül, M. A., Harirchian, E., Işık, M. F., Aghakouchaki Hosseini, S. E., & Işık, E. (2022). A hybrid ANN-GA model for an automated rapid vulnerability assessment of existing RC buildings. *Applied Sciences*, 12(10), 5138.
- [30] Matlab, (2017). Matlab, version R2017a, MathWorks.

Production of Silica Coated Cobalt Nanoparticles Via A Synthetic Nanofabrication Method

Yavuz Nuri Ertaş*¹ 

*¹ Erciyes University, Biomedical Engineering, Kayseri, TÜRKİYE

¹ Erciyes University, ERNAM - Nanotechnology Research and Application Center, Kayseri, TÜRKİYE

(Alınış / Received: 21.07.2023, Kabul / Accepted: 23.08.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 31.08.2023)

Keywords

Nanoparticle,
Cobalt,
Nanofabrication,
Magnetism

Abstract: In the periodic table, cobalt is the second-highest magnetic element at room temperature, which makes it a material of choice in many applications ranging from magnetic sensors and memory devices to catalysis and magnetic resonance imaging. Cobalt nanoparticles have been synthesized via chemical methods to further capitalize on their properties. However, the limited range of nanoparticle sizes and purity is the biggest challenge encountered when traditional synthesis approaches are considered. In order to fully realize the potential of cobalt nanoparticles, this research uses a non-chemistry-based, synthetic nanofabrication approach to produce ferromagnetic and surface passivated cobalt nanoparticles that are less than 100 nm in size.

Sentetik Nanofabrikasyon Yöntemiyle Silika Kaplı Kobalt Nanoparçacıklarının Üretimi

Anahtar Kelimeler

Nanoparçacık,
Kobalt,
Nanofabrikasyon,
Manyetizma

Öz: Kobalt, periyodik tablodaki elementler arasında, oda sıcaklığında en yüksek ikinci manyetik elementtir ve bu, onu manyetik sensörler ve hafıza cihazlarından kataliz ve manyetik rezonans görüntülemeye kadar birçok uygulamada tercih edilen bir malzeme haline getirmiştir. Kobalt nanoparçacıkları genel itibarıyla kimyasal yöntemlerle sentezlenmiştir. Bununla birlikte, sınırlı nanoparçacık boyutları ve saflık limitleri, geleneksel kimyasal sentez yaklaşımları göz önüne alındığında karşılaşılan en büyük zorluklardır. Kobalt nanoparçacıklarının potansiyelini tam olarak gerçekleştirmek için, bu araştırma, ferromanyetik ve yüzeyi pasifleştirilmiş, 100 nm altı boyutlarda kobalt nanoparçacıkları üretmek için ıslak kimya temelli olmayan, sentetik bir nanofabrikasyon yaklaşımını rapor etmektedir.

*Corresponding Author, email: yavuznuri@gmail.com

1. Introduction

Cobalt (Co) is one of the most promising metallic nanoparticles (NPs) and has been of significant interest to researchers from a variety of sectors for a long time. Co NPs often feature exceptional magnetic, electrical, and catalytic capabilities, which are of scientific and technological interest in a variety of domains, such as recording media, magnetic sensors, magnetic memory, and catalysis [1]. Cobalt powder, its oxides, salts, and complexes are used as catalysts in the petrochemical sector. Due to their high saturation magnetization and significant anisotropy, Co NPs are well-suited for high-density data storage and permanent magnet applications. Recently, it was shown that Co NPs are useful for absorption of electromagnetic waves, wireless communications, and high-frequency circuit devices [2, 3]. Besides, Co NPs have a natural advantage in biomedical applications, such as drug delivery and magnetic resonance imaging, where high quality and purity are demanded to minimize magnetization or response stability changes. As the metal center of vitamin B12, cobalt plays a significant role from the standpoint of biological function [4]. Despite this, excessive exposure has a number of negative health impacts. Consequently, it is essential to monitor the amount of cobalt in its many forms in the human body. However, great interest in cobalt remains due to its unique features and numerous applications. Notably, the discovery of the extraordinary physical and chemical characteristics of Co NPs, which are connected with the existence of quantum size effects,

has made the already amazing features of cobalt much more intriguing. The continuous density of states typical of bulk matter is replaced with discrete levels that depend on the size and spacing of the particles. As the size of NPs decreases, the fraction of surface atoms increases compared to the total number of atoms [5]. There is a significant shift in the characteristics of surface atoms, and as a result, the interaction between surface atoms and atoms within the particle alters, which can result in a fundamental change in physical properties. Cobalt nanoclusters, for instance, have a higher magnetism than bulk cobalt due to the greater magnetization of surface atoms resulting from their tiny size. To produce Co with varying morphology and size distribution, numerous synthetic methods, such as solvothermal, microemulsion, sonication, reduction of Co salt, reduction in inverse micelles, and electrochemical synthesis, have been utilized in the past [6–9].

Co NPs are prone to oxidation under ambient conditions; thus, preventing oxidation is one of the most essential issues during their production [10]. Chemical reduction of Co NPs is, in general, the simplest method for controlling the composition, size, and shape of NPs, as well as scaling up production, without the need for specialized lab equipment or conditions. Nonetheless, it has considerable limitations when it comes to the production of chemically pure NPs without reagent or byproduct contamination of the surface layer. However, heat degradation makes it difficult to regulate the chemical composition of the final NPs. Therefore, it is essential to develop novel manufacturing methods and synthesis approaches in order to create Co NPs that are clean and of a regulated size. A synthetic and nanofabrication-based methodology was used to produce surface-passivated, water-dispersed, and stable Co NPs, as described in this study.

2. Material and Method

2.1. Materials

Four-inch p-type (100) silicon wafers were purchased from UniversityWafer (USA). 150 nm diameter polystyrene nanospheres with no surface functionalization were obtained from Magsphere Inc. (USA). Electron beam evaporation sources and crucibles were supplied from Testbourne Ltd. (UK). The chemicals employed were received from Sigma-Aldrich (USA), and used without further purification.

2.2. Nanofabrication process

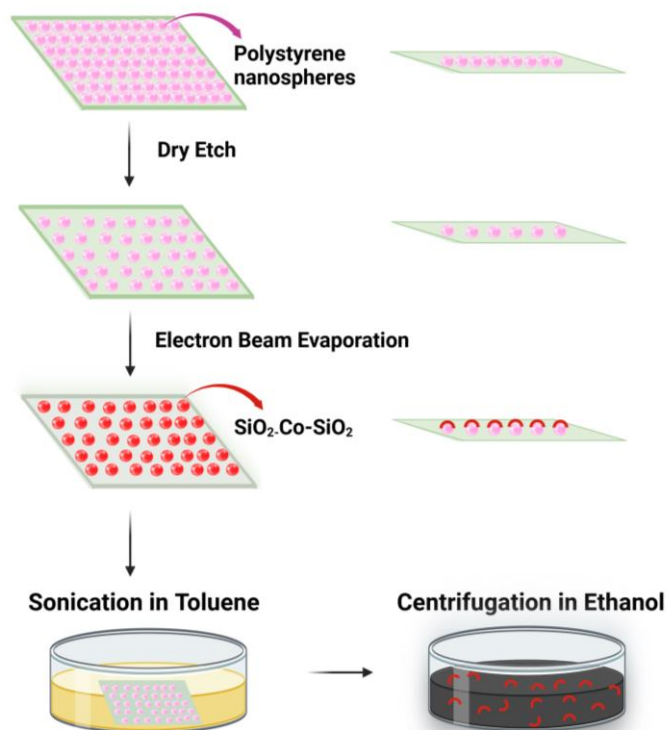


Figure 1. Schematics of the nanofabrication process. Polystyrene nanospheres are first coated onto silicon wafers, and then their sizes are reduced using a dry etch process utilizing oxygen gas. Later, silica and cobalt layers are deposited using the electron beam evaporation technique. The substrates are then immersed in a solution of toluene and sonicated for 12 hours to etch away the polystyrene nanospheres. The nanoparticles are centrifuged in an ethanol solution three times to remove the polystyrene residues and purified for further use.

The nanoparticles were produced using a nanofabrication process in which monolayers of polystyrene nanospheres serve as templates for material deposition [11]. Polystyrene nanobeads were spin-coated onto silicon wafers to form a monolayer. As the nanospheres had no surface ligands, they displayed hydrophobicity; therefore, the nanosphere solution was diluted with a 1:1 (v/v) ethanol solution to allow the nanospheres to spread over the wafer substrates to ensure the coating is uniform and surface coverage is high. Prior to the nanobead coating process, wafers were treated with O₂ plasma for 30 seconds at 125 W plasma power and 60 sccm O₂ flow to render the wafer surface hydrophilic and improve the dispersion of the nanosphere solution on the surface. The spin coating process was applied for 60 seconds at a speed of 6,000 rpm with a ramp rate of 500 rpm per second. The coating technique revealed that untreated wafers had low nanobead coverage in multilayer areas. In order to minimize the size of the polymer nanospheres, reactive ion etching (RIE) was conducted [12]. Specific nanosphere diameters might be obtained by altering the length and/or plasma power of this stage. However, extended etching should be avoided since it leads to the loss of spherical form. Adjustments were made to the process parameters in order to achieve nanospheres of 100 nm in diameter, as confirmed by scanning electron microscopy (SEM). Silica was chosen as the capping layer due to its biocompatible nature and ease of chemical functionalization in future applications. Layers of 10 nm of SiO₂, 20 nm of Co of 99.95% purity, and 10 nm of SiO₂ were deposited by electron-beam evaporation onto the 10° tilted substrates under a vacuum level of 10⁻⁶ mTorr to form Co@SiO₂ layers on the etched nanospheres. To guarantee layer consistency, the wafer holder was continually rotated at 20 rpm during the coating process. Deposition rates and film thicknesses for each coating were monitored in real time using quartz crystals. Transmission electron microscopy (TEM) was utilized to evaluate the film thicknesses. In order to minimize the oxidation of the Co layer, the oxygen concentration in the vacuum chamber needs to be reduced, which was achieved by pre-depositing the Co metal with the shutter closed. This process lowers the pressure of the vacuum chamber through the absorption of remaining oxygen by the Co metal. Following the deposition of silica and Co layers, the polymer beads on the wafer substrates were removed by sonicating them in a toluene suspension, leaving the Co@SiO₂ nanostructures freely floating in solution. Multiple centrifugation processes were then applied to collect the nanostructures, which were subsequently suspended in ethanol for future usage. The experimental schematics and process flow are given in Figure 1.

2.3. Characterization

The nanoparticles' morphology was visualized using SEM (JEOL JSM 7500F) and TEM (FEI CM120). Coulter Beckman Dynamic Light Scattering Analyzer – N4 Plus was utilized for size distribution measurements. Using a superconducting quantum interference device (SQUID, Quantum Design MPMS® XL, USA) with applied field strengths up to 1 T, magnetizations were performed. The diamagnetic contribution of the sample holder and background was removed from the magnetization measurements.

3. Results

Monolayer coating of polystyrene nanospheres on the surface of silicon wafers is an important step to achieve nanoparticles in the desired shape and size, because if monolayer is not ensured, the metal deposition step will produce aggregates and thin film formation where the end nanoparticles will be large and in irregular shapes. A large-area SEM view of the substrates with nanospheres is shown in Figure 2a, where monolayer formation was observed. After this critical step, via a dry etch process utilizing oxygen gas, the dimensions of the nanospheres were reduced as oxygen reacts with the organic nature of polystyrene and carbon dioxide, and water vapors were generated, which were pumped out of the reaction chamber. Following, silica and cobalt thin layers were electron beam evaporated with a controlled thickness. Figure 2b shows the SEM image of the substrate template after the deposition step, where the nanospheres are coated with silica and cobalt layers and the gaps between the nanospheres are visible. In order to remove the coated layers on the nanosphere template via a wet etch process utilizing toluene, these gaps are crucial; otherwise, the organic solvent cannot attach the polystyrene and remove the nanospheres from the surface in the ultrasonication step. The substrates were immersed in a glass beaker containing toluene solution, and ultrasonication was applied for 12 hours. In this step, toluene gradually etches away the polystyrene, leaving the Co@SiO₂ nanoparticle freely suspended in the solution. To purify the dissolved polystyrene residues, samples were centrifuged three times at 15,000 rpm for 20 minutes in ethanol and collected for further use and characterization.

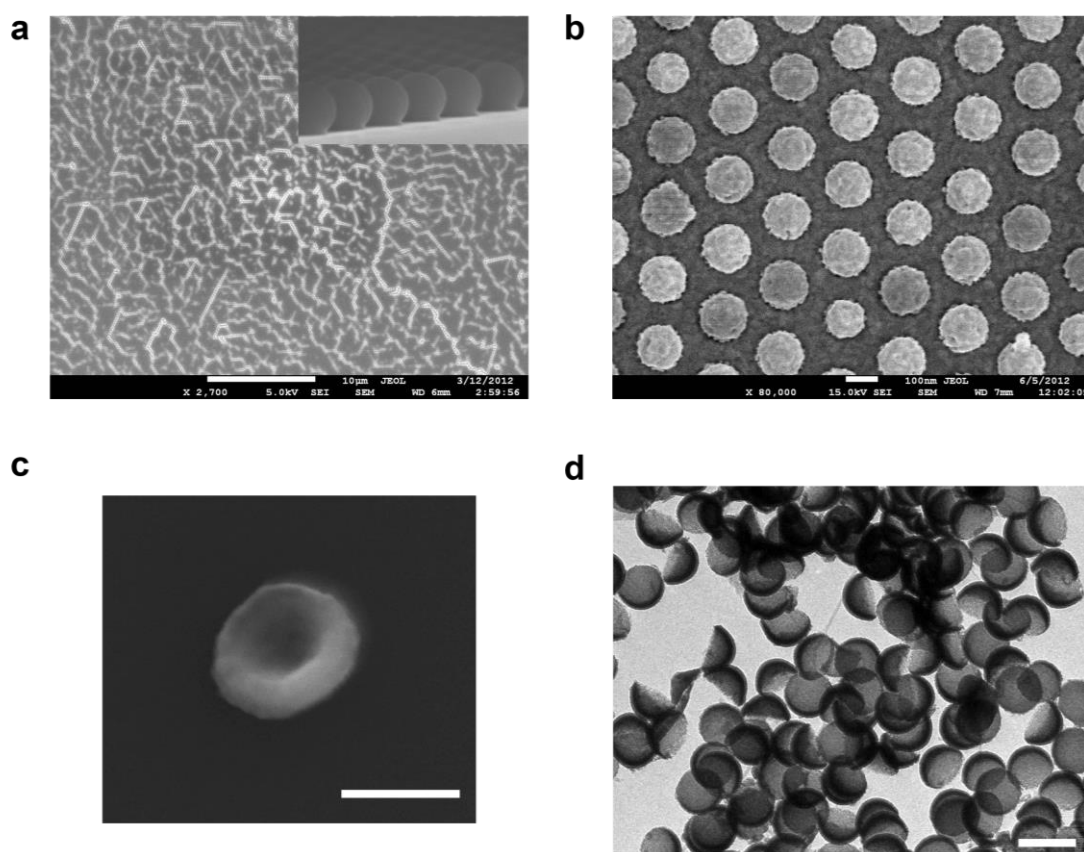


Figure 2. a) A large area scanning electron microscope (SEM) image of the wafer substrate coated with polystyrene nanospheres in a monolayer fashion. Inset shows the angled side view of the coated nanospheres, b) SEM image of the polystyrene nanospheres after size reduction and coating with silica and metal layers using electron beam evaporation technique, c) SEM image of a single Co@SiO₂ nanoparticle after the removal of nanosphere templates, d) Transmission electron microscope (TEM) image of the Co@SiO₂ core-shell nanoparticles, where lighter and darker areas clearly indicate silica and cobalt layers. Scale bars are 100 nm in (c) and (d).

Figure 2c shows the SEM image of a single Co@SiO₂ nanoparticle with a nanocrescent moon shape. TEM observation is provided in Figure 2d, where a clearly homogeneous size distribution and shape uniformity over a large sample of nanoparticles are ensured. Here, the dark contrast originates from the existence of cobalt, which has a higher atomic number compared to silica, whereas the lighter areas correspond to silica layers. After verifying the desired shape and size of the nanoparticles, the DLS technique was used to assess the size distribution and existence of aggregates, if any. Figure 3a shows DLS results where a single peak was observed, indicating no aggregation and similar size information obtained from SEM and TEM data. Here, it should be stressed that the nanoparticles are ligand-free; therefore, as opposed to regular DLS results where the mean hydrodynamic size is generally larger than the physical size observed from TEM, similar results were obtained from these different measurements. However, DLS is a technique that is most appropriate when measuring the size of spherical objects, whereas the produced nanoparticles are not symmetrical, where the largest dimension is around 100 nm and the thickness is 40 nm at the center and gradually decreases towards the edges of the nanocrescent moon structures, which also explains why the peak in DLS is less than 100 nm. In order to reveal the elemental compositions and presence of silica and cobalt, SEM-EDX analysis was conducted. Figure 3b shows the elemental spectrum, which includes the characteristic peaks for Si, O and Co atoms along with C. The background of the measurement setup provides this carbon contribution. Nevertheless, the compositional analysis proved the presence of silica and cobalt layers. The magnetic properties of the Co@SiO₂ nanoparticles were investigated by SQUID magnetometry using external fields up to 1 T (10 kOe) at room temperature (Figure 3c). The M-H curve displayed a hysteresis effect, indicating the ferromagnetic behavior of cobalt. The saturation magnetization was observed at 49 emu/g, which is attributable to the nanofabrication technique because, as opposed to the wet synthesis method, evaporation in a vacuum environment minimizes the formation of cobalt oxides, which display poor magnetism compared to pure cobalt.

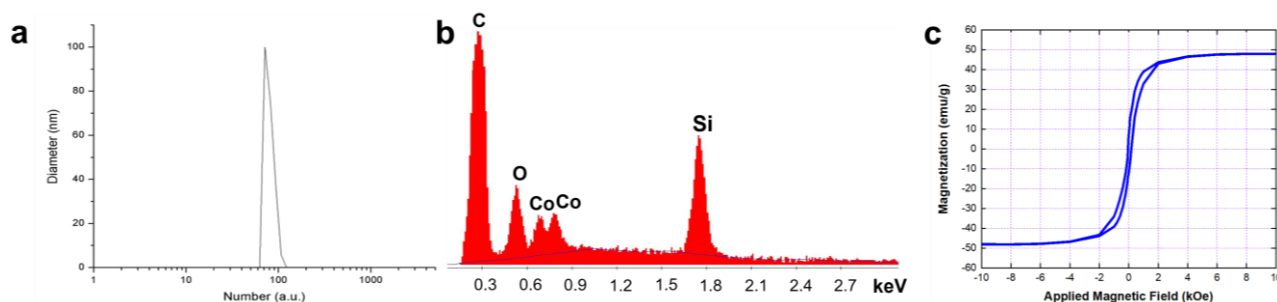


Figure 3. a) Dynamic light scattering measurement of the Co@SiO₂ core-shell nanoparticles, b) Elemental spectrum of the Co@SiO₂ nanoparticles, indicating the existence of Si, O and Co elemental compositions. The carbon peak comes from the background, c) Superconducting quantum interference device (SQUID) magnetometer measurement of the powder form nanoparticles. The hysteresis refers to the ferromagnetic nature of the sample.

4. Discussion and Conclusion

The production of surface-passivated nanoparticles with desirable magnetic properties is an important area of research. Cobalt is one of the elements in the periodic table with the highest magnetic moment, and the synthesis of cobalt nanoparticles is traditionally realized through standard chemical methods. Although wet chemistry enables size and shape control and functionalization of nanoparticle surfaces, its main limitation lies in the production of highly pure nanoparticles. Besides, there is a certain size above which cobalt nanoparticles cannot be produced. This research offers an alternative way of manufacturing cobalt nanoparticles with high magnetism and large sizes. Specifically, a vacuum environment was utilized to minimize the oxidation of cobalt, and silica shell layers were covered onto the cobalt core to produce surface passivated nanoparticles. To achieve this, polystyrene nanospheres were utilized as sacrificial templates on a silicon wafer. Through several nanofabrication steps such as dry etch and electron beam evaporation, crescent-moon-shaped Co@SiO₂ nanoparticles were obtained. Electron microscopy characterization confirmed the size, shape, and elemental composition of the end product. The dynamic light scattering technique was used to analyze possible aggregations, and it was verified that the nanoparticles were highly dispersed. Magnetic measurements were conducted at room temperature, and high saturation magnetism for cobalt was reported along with ferromagnetic behavior. A possible explanation for this is due to the formation of a cobalt layer without or with minimal oxidation, which is the main advantage of the developed production technique. This technology, unlike conventional methods, may be adapted to generate nanoparticles of various metals, making them suitable for technological applications.

Acknowledgment


This study received funding support from the 2232 International Fellowship for the Outstanding Researchers Program of TÜBİTAK (Project No: 118C346).

References

- [1] Ansari, S. M., Bhor, R. D., Pai, K. R., Sen, D., Mazumder, S., Ghosh, K., Kolekar, Y. D., Ramana, C. V. Cobalt nanoparticles for biomedical applications: Facile synthesis, physiochemical characterization, cytotoxicity behavior and biocompatibility. *Applied Surface Science*, 414(2017), 171-187.
- [2] He, C., Song Q., Xinzhen W., Jiurong L., Liqiang L., Wei L., Masahiro I., Ken-ichi M. Facile synthesis of hollow porous cobalt spheres and their enhanced electromagnetic properties. *Journal of Materials Chemistry*, 22(2012), 22160-22166.
- [3] Wang, H., Xiang, L., Wei, W., An, J., He, J., Gong, C. and Hou, Y. Efficient and lightweight electromagnetic wave absorber derived from metal organic framework-encapsulated cobalt nanoparticles. *ACS applied materials & interfaces*, 9(2017), 42102-42110.
- [4] Thanh, N. T., Green, L. A. Functionalisation of nanoparticles for biomedical applications. *Nano today*, 5(2010), 213-230.
- [5] Panigrahi, S., Basu, S., Praharaj, S., Pande, S., Jana, S., Pal, A., Ghosh, S. K., Pal, T. Synthesis and size-selective catalysis by supported gold nanoparticles: study on heterogeneous and homogeneous catalytic process. *The Journal of Physical Chemistry C*, 111(2007), 4596-4605.
- [6] Kobayashi, Y., Horie, M., Konno, M., Rodríguez-González, B., Liz-Marzán, L. M. Preparation and properties of silica-coated cobalt nanoparticles. *The Journal of Physical Chemistry B*, 107(2003), 7420-7425.

- [7] Khusnuriyalova, A. F., Caporali, M., Hey-Hawkins, E., Sinyashin, O. G., Yakhvarov, D. G. Preparation of cobalt nanoparticles. *European Journal of Inorganic Chemistry*, (30)2021, 3023-3047.
- [8] Salgueiriño-Maceira, V., Correa-Duarte, M. A. Cobalt and silica based core-shell structured nanospheres. *Journal of Materials Chemistry*, 16(2006), 3593-3597.
- [9] Srinivasan, S. Y., Paknikar, K. M., Bodas, D., Gajbhiye, V. Applications of cobalt ferrite nanoparticles in biomedical nanotechnology. *Nanomedicine*, 13(2018), 1221-1238.
- [10] Morcos, B., Lecante, P., Morel, R., Haumesser, P. H., Santini, C. C. Magnetic, structural, and chemical properties of cobalt nanoparticles synthesized in ionic liquids. *Langmuir*, 34(2018), 7086-7095.
- [11] Ertas, Y. N., Jarenwattananon, N. N., Bouchard, L. S. Oxide-free gadolinium nanocrystals with large magnetic moments. *Chemistry of Materials*, 27(2015), 5371-5376.
- [12] Ertas, Y. N., Bouchard, L. S. Controlled nanocrystallinity in Gd nanobowls leads to magnetization of 226 emu/g. *Journal of Applied Physics*, 121(2017), 093902.

Bio-removal of Remazol black 5 dye by *Allium scorodoprasum* L. biomass; isotherms, kinetic and thermodynamic studies

Dilek Şenol Arslan¹ 

*¹Abdullah Gul University Engineering Faculty Nanotechnology Engineering, KAYSERİ

(Alınış / Received: 30.04.2023, Kabul / Accepted: 13.07.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 31.08.2023)

Keywords

Biosorption
Allium scorodoprasum L.
Isotherm
Kinetic
Thermodynamic

Abstract: The current study aims to use *Allium scorodoprasum* L. biomass as an biosorbent for the bio-removal of Remazol black 5 (RB5) dye from aqueous solutions. The binding capacity of *Allium scorodoprasum* L. as a biosorbent for RB5 was investigated by recording the changes in pH, concentration of RB5 dye, biosorbent mass, temperature and contact time. Dubinin-Radushkevich (D-R), Freundlich, and Langmuir isotherm models were used to interpret the experimental data. The maximum RB5 dye biosorption capacity of the biosorbent was found to be 19.8 mg g⁻¹ at 25°C. The biosorption energy indicated that the biosorption process was chemical. Kinetic studies have shown that the biosorption process follows the rate kinetics of PFO and IPD. Thermodynamic studies have shown that RB5 dye biosorption is endothermic and spontaneous. The *Allium scorodoprasum* L. biomass had a significant biosorption capacity for the anionic RB5 dye.

Remazol black 5 boyasının *Allium scorodoprasum* L. biyokütlesi ile biyolojik olarak uzaklaştırılması; biyosorpsiyon izotermleri, kinetik ve termodinamik çalışmalar

Keywords

Biyosorpsiyon
Allium scorodoprasum L.
İzoterm
Kinetik
Termodinamik

Öz: Bu çalışma, *Allium scorodoprasum* L. biyokütlesini Remazol black 5 (RB5) boyasının sulu çözeltilerden biyo-giderimi için bir biyosorbent olarak kullanmayı amaçlamaktadır. *Allium scorodoprasum* L. biyosorbentinin RB5'e bağlanma kapasitesi, kesikli yürütülen biyosorpsiyon çalışmalarında pH, RB5 boya konsantrasyonu, temas süresi ve sıcaklıktaki değişimler kaydedilerek araştırılmıştır. Deneysel verileri açıklamak için Dubinin-Radushkevich (D-R), Freundlich ve Langmuir izoterm modelleri kullanılmıştır. Biyosorbentin maksimum RB5 boya biyosorpsiyon kapasitesi 25 °C'de 19,8 mg g⁻¹ olarak bulunmuştur. biyosorpsiyon enerjisi, biyosorpsiyon sürecinin kimyasal olduğunu gösterdi. Kinetik çalışmalar biyosorpsiyon sürecinin PFO ve IPD hız kinetiğini takip ettiğini göstermiştir. Termodinamik çalışmalar RB5 boya biyosorpsiyonunun endotermik spontane olduğunu göstermiştir. *Allium scorodoprasum* L. biyokütlesi anyonik RB5 boyası için önemli bir biyosorpsiyon kapasitesine sahiptir.

*Corresponding Author, email: dilek.senol@agu.edu.tr

1. Introduction

In recent years, water pollution is an important environmental problem that has received worldwide attention [1]. Industrial wastewater contains a variety of pollutants that are difficult to remove, such as dyes, heavy metals, organics, cyanide, and others [2-5].

The dyes are the main organic pollutants released with industrial textile wastewater because they are highly visible and undesirable in water, even in low quantities [6, 7]. More importantly, most organic dyes are toxic, non-biodegradable, and even teratogenic, carcinogenic and mutagenic, posing serious threats to human health and

marine organisms [8, 9]. In addition, many dye products contain well-known carcinogens such as benzidine or they can produce some other aromatic compounds in the environment via their microbial degradation [10]. Therefore, it is an imperative to treat waste waters in order to eliminate these harmful molecules.

Accordingly, there are many alternative methods available for address these problems such as; membrane separation, chemical oxidation, adsorption, biosorption, coagulation and precipitation to treat dye-containing wastewaters[11].

Adsorption is the most popular of these methods owing to its low cost, adaptability and simple design, resistance to toxic-substances, and great effectiveness [12, 13]. For the purpose of dye removal from wastewater, natural minerals such as clay [14], vermiculite [15], sepiolite [16], and dolomite [17], as well as natural polymers like chitosan [18] and lignin [19], have become increasingly employed in recent years [20-22].

For the purpose of dye removal from wastewater, natural minerals and polymers as adsorbents including clay [14], vermiculite [15], sepiolite [16], and dolomite [17], as well as natural minerals like chitosan [18] and lignin [19], have become increasingly employed in recent years [20-22].

Adsorption of organic and inorganic materials on the surfaces of either living or dead biomass on their derivatives is referred to as biosorption. *Allium* is the most popular and distinctive genus in the Alliaceae family, with 750 species categorized into 15 subgenera and 72 sections. *Allium scorodoprasum* L. is a plant that grows 25–90 cm tall and has 1-2 cm-diameter bulbs [23].

Previous studies have shown that Alliaceae family exhibits strong adsorption properties towards heavy metals [24]. It has also shown potential for the removal of organic pollutants, such as dyes and phenols [25, 26].

This study is the first report describing the removal of RB5 dye using the *Allium scorodoprasum* L. biomass. The objective of this research was to developed an effective biosorbent for removing hazardous industrial dye from wastewater. *Allium scorodoprasum* L. biomass is a natural, readily available and at the same time low cost biosorbent for the biosorption of colored pollutants. In this study, the biosorbent properties of *Allium scorodoprasum* L. biomass were investigated for the effective removal of RB5 dye from aqueous solution. The effect of solution pH, biosorbent amount, initial RB5 dye concentration, contact time and temperature on RB5 dye biosorption were investigated using the batch method. The experimental data obtained showed that *Allium scorodoprasum* L. biomass can be used as an alternative biosorbent for the treatment of wastewater containing RB5 dye.

2. Material and Method

2.1. Material

Allium scorodoprasum L. was collected during July 2022 on Zara, Sivas, Türkiye. RB5 ($C_{26}H_{21}N_5Na_4O_{19}S_6$) was used as a pollutant, which purchased from Sigma-Aldrich (USA) (Fig. 1). Deionized (DI) water was used for all experiments.

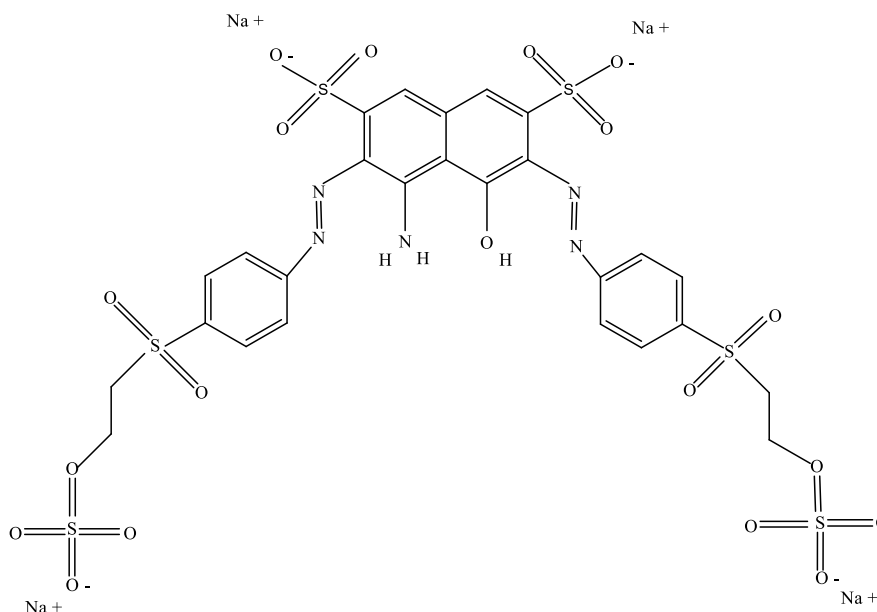


Figure 1. Chemical structure of RB5.

2.1.1. Preparation of *Allium Scorodoprasum L.* Biomass

Allium Scorodoprasum L. samples were cut into small pieces and washed with DI, then dried using traditional sun-drying method. A schematic illustration of *Allium Scorodoprasum L.* sample preparation in Fig.2.

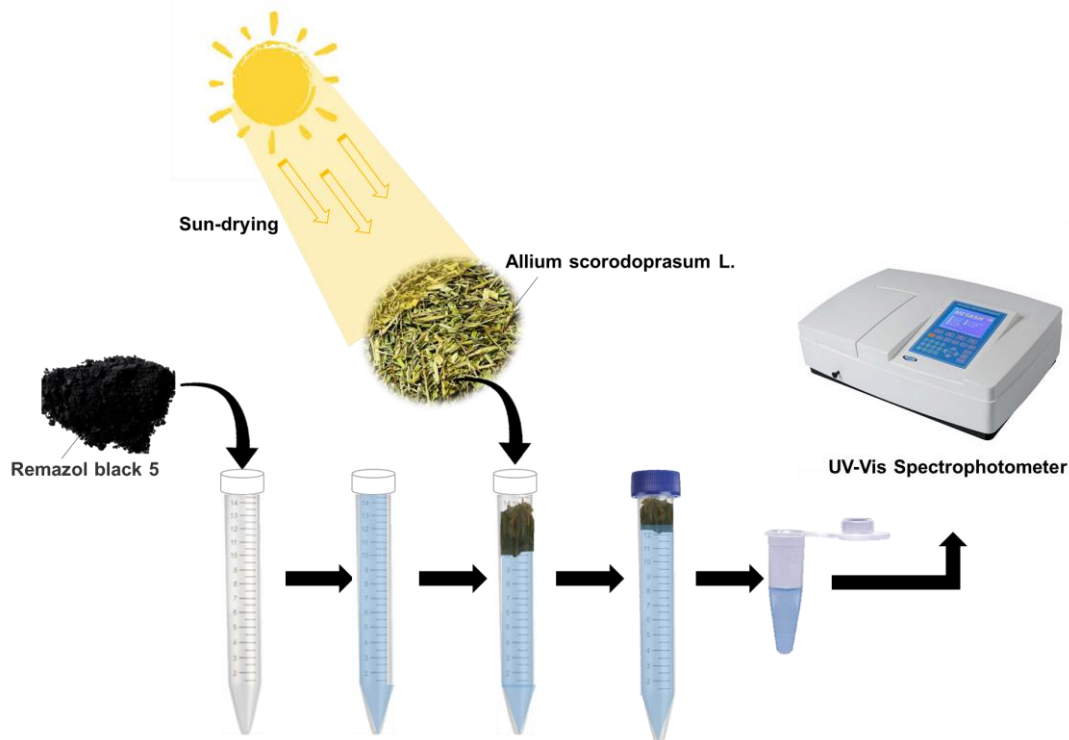


Figure 2. A schematic illustration of *Allium Scorodoprasum L.* sample preparation.

2.2. Method

The structure and morphology of *Allium scorodoprasum L.* was examined using a scanning electron microscope (Zeiss Gemini) with a 10 kV applied voltage. FT-IR spectra were used to identify the functional properties of *Allium scorodoprasum L.* using an FT-IR spectrometer (Thermo Nicolet Avatar 370). The concentration of Remazol Black 5 was measured with a UV-Visible spectroscopy at a wavelength of 598 nm.

2.2.1. Batch biosorption experiments

A stock RB5 dye solution, 1000 mg L⁻¹, was prepared with DI water. The biosorption of RB5 dye onto *Allium scorodoprasum L.* material was performed in 10 mL aqueous solutions, containing 100 mg *Allium scorodoprasum L.* material and 200 mg L⁻¹ RB5 dye. The experimental conditions pHs (from 2 to 12), and temperature (5 °C, 25 °C, and 40 °C) were fixed. After 24 hours, the supernatant was filtered and the equilibrium RB5 dye concentration was determined at λ=598 nm [27]. Biosorption%, Q (mol kg⁻¹) and desorption % were calculated with Eq. 1, Eq. 2. and Eq. 3

$$\text{Biosorption}\% = \left[\frac{C_i - C_f}{C_i} \right] \times 100 \quad (1)$$

$$Q = \left[\frac{C_i - C_f}{m} \right] \times V \quad (2)$$

$$\text{Desorption}\% = \frac{Q_{des}}{Q_{ads}} \times 100 \quad (3)$$

Where, C_i is the initial concentration (mg L⁻¹), C_f is equilibrium concentration (mg L⁻¹), m states to the biosorbent mass (g), V is the solution volume (L), Q_{des}; desorbed amount of RB5 (mg kg⁻¹) and Q_{ads}; biosorbed amount of RB5 (mg kg⁻¹).

3. Results

3.1. FT-IR analysis

Understanding the mechanism of *Allium scorodoprasum* L. surface binding to the RB5 dyes, the functional groups present on the native and after-adsorption plant biosorbent were characterized using an FTIR spectrophotometer. The FTIR spectra of unloaded and RB5 loaded *Allium scorodoprasum* L. biomass shown in Fig.3.

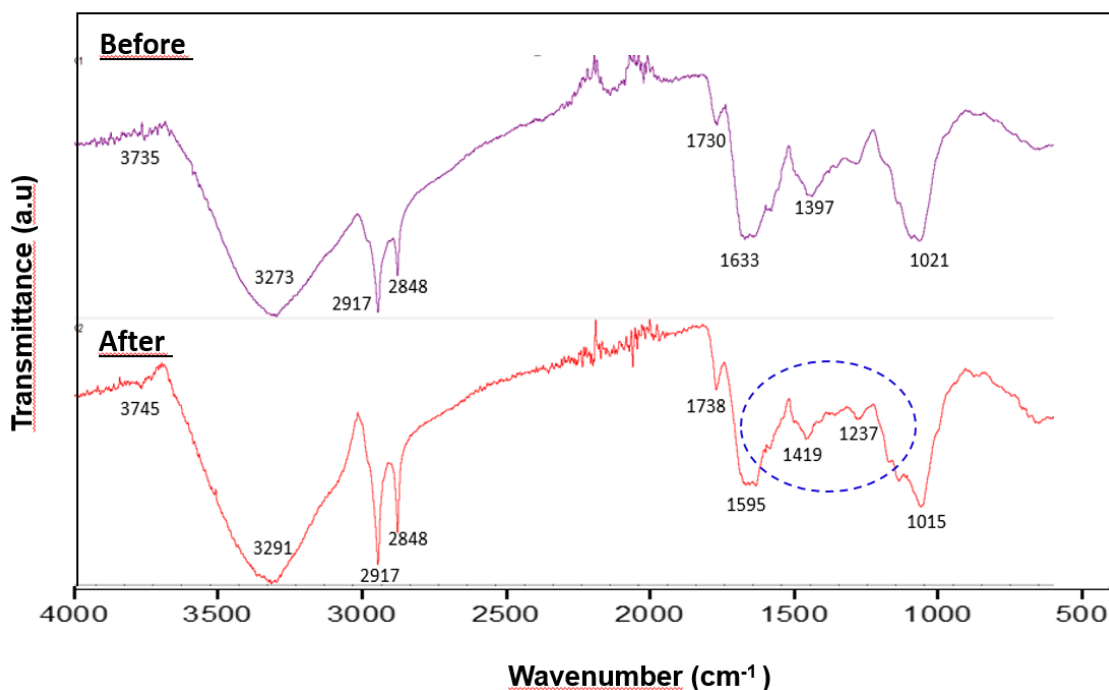


Figure 3. FT-IR spectrum of unloaded and RB5 loaded *Allium scorodoprasum* L. biomass.

Table 1. Assignment of bands to the functional group on the surface of *Allium scorodoprasum* L. as observed from FTIR spectroscopy.

Wave numbers (cm ⁻¹)		Assignment
Unloaded <i>Allium scorodoprasum</i> L.	RB5 Loaded <i>Allium scorodoprasum</i> L.	
3745	3735	O-H stretching/N-H stretching
3273	3291	O-H stretching
2917	2917	CH ₂ asymmetric stretching
2848	2848	C-H stretching
1730	1738	C=O stretching vibration.
1633	1595	vibration of H ₂ O molecules.
1397	1430	vibrations of -CH ₂
---	1237	PO ₂ ⁻ asymmetric and symmetric stretching vibrations
1021	1015	stretching vibrations of -C-O-C.

After RB5 biosorption, -OH and -NH, C=O, C=N, C=C S-O and S-O stretching vibration peaks were shifted. The reason of these shifts are attributed to the interaction between functional groups on the surface of *Allium scorodoprasum* L and RB5. The azo dyes showed a strong band at ~1730 cm⁻¹ due to $\nu(C=O)$ [28].

3.2. SEM analysis

The plant's morphology was determined using scanning electron microscopy, which was also utilized to take photos of the microstructures. This technique can be utilized to comprehend the morphology and behavior of the plant both before and after the dye has been biosorbed.

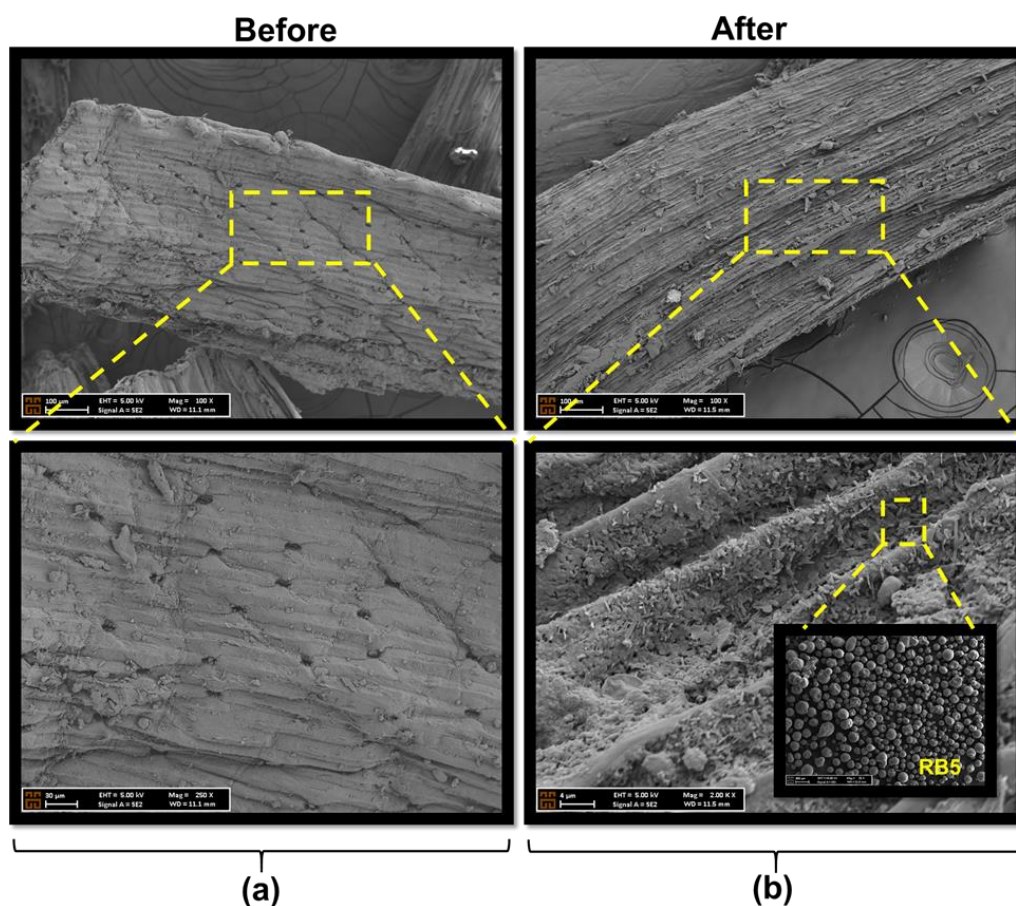


Figure 4. SEM images of RB5 biosorption before (a) and after (b).

As seen in Fig. 4, RB5 dye aggregates filled the gaps and clustered within the layers of the bio-composite surface, as a result of the biosorption processes. SEM analysis was used to visualize the presence of pores and the inner surface before adsorption; the image taken after biosorption of RB5 dye showed that the porous structure was filled by biosorption and RB5 was deposited on the *Allium scorodoprasum L.* surface. SEM pictures demonstrate that the presence of a large amount of aggregates on the biosorbent surface indicates that the biosorbent is an excellent material for dye biosorption.

3.3. Effect of initial pH and PZC for *Allium scorodoprasum L.* biomass

The biosorption of the RB5 dye onto *Allium scorodoprasum L.* biosorbent in solutions with different pH values is shown in Figure 5. Biosorption results has indicated that a sharp decrease between pH 2.0 and 4.0. After this point, it gradually decreased (pH: 4.0-8.0). The point of zero charge (pHpzc) of *Allium scorodoprasum L.* biosorbent was found 5.72. The surface (pH < pHpzc) of the *Allium scorodoprasum L.* biosorbent was positive at acidic pHs. In this case, H⁺ ions and anionic RB5 dye molecules competed for binding to active sites on the surface of the *Allium scorodoprasum L.* biosorbent. The *Allium scorodoprasum L.* biosorbent, which has a positively surface charge, electrostatically attracted the anionic RB5 dye molecules. Therefore, the biosorption efficiency was high at acidic pHs. At alkaline pHs above the pHpzc, the surface of the *Allium scorodoprasum L.* biosorbent was negative. The *Allium scorodoprasum L.* biosorbent, which had a negatively surface charge, so electrostatically repulsed the anionic RB5 dye molecules. As a result, the biosorption efficiency decreased.

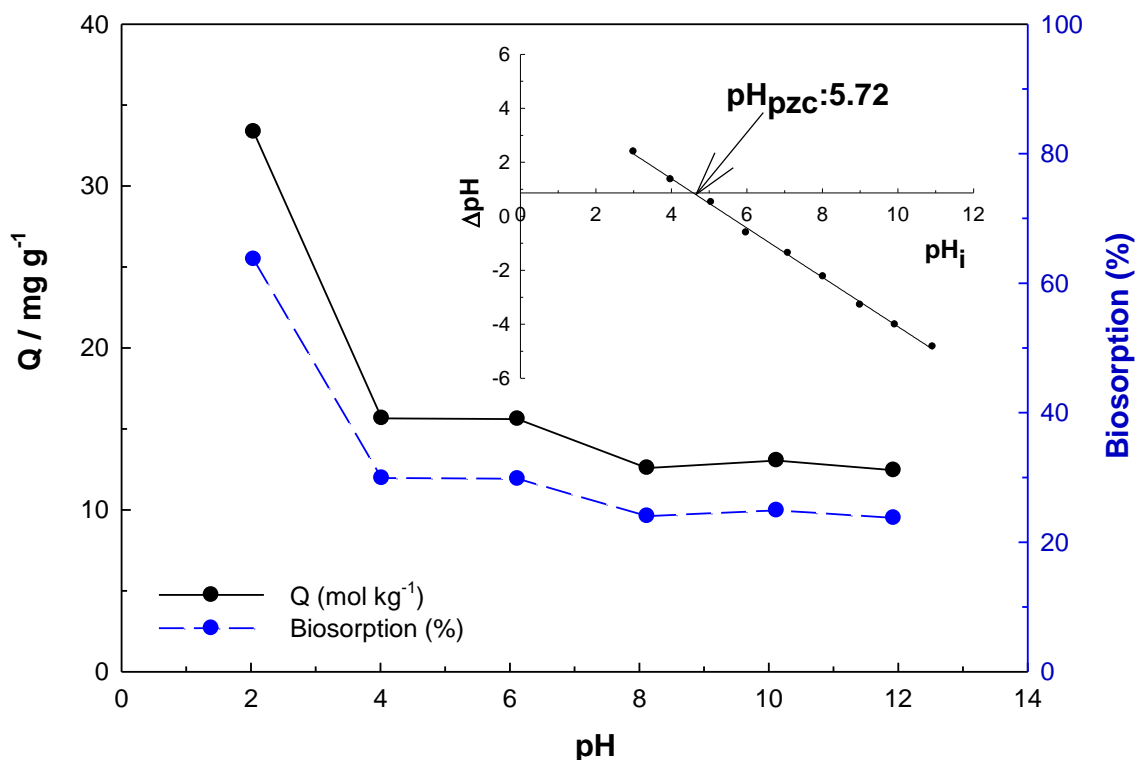


Figure 5. Effect of pH on RB5 biosorption onto *Allium scorodoprasum L.* and pzc for *Allium scorodoprasum L.*

3.4 Effect of biosorbent mass

Biosorption behavior was examined between 1 g L^{-1} and 10 g L^{-1} (Figure 6). RB5 dye biosorption increased with the increase in the amount of *Allium scorodoprasum L.* biosorbent. Up to a certain point, the action centers on the surface of the *Allium scorodoprasum L.* biosorbent increased as the amount of biosorbent increased. Thus, RB5 dye molecules more easily penetrated the action centers on the *Allium scorodoprasum L.* biosorbent surface. The maximum amount of biosorption was found to be about 57% at 10 g L^{-1} of the *Allium scorodoprasum L.* biosorbent. Thus, the increase in RB5 dye biosorption efficiency was a function of the increase in active binding sites.

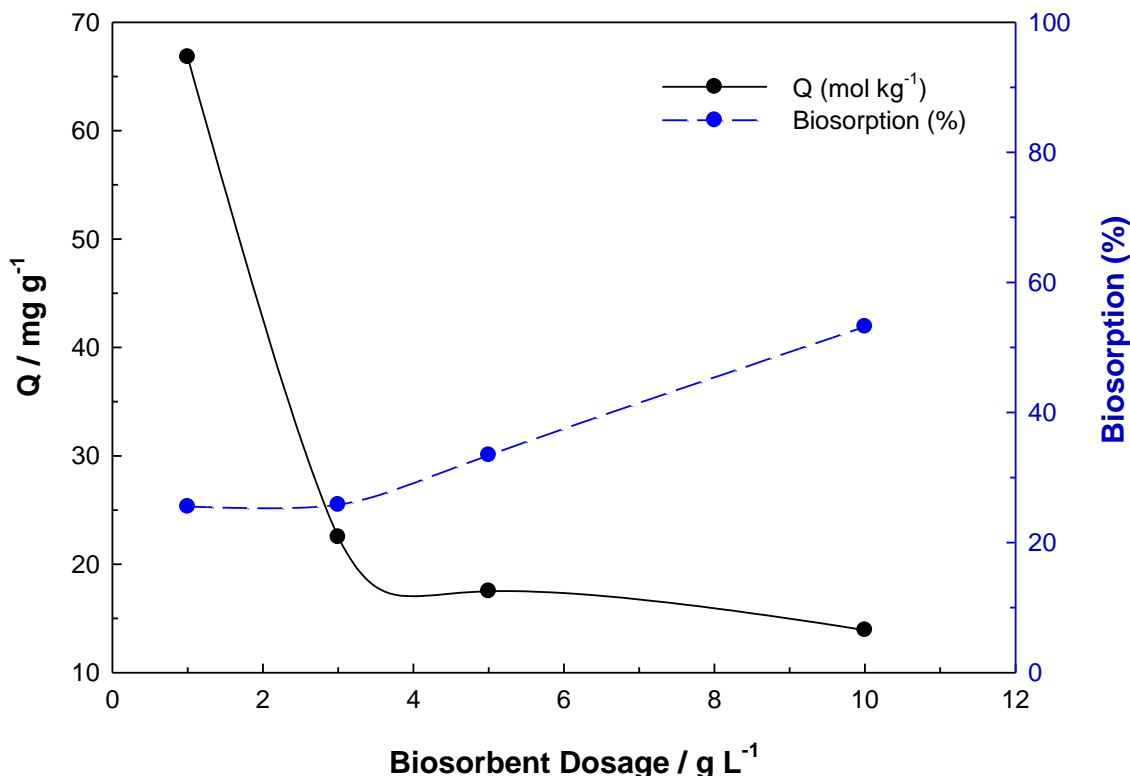


Figure 6. Effect of biosorbent mass on RB5 biosorption onto *Allium scorodoprasum L.*

3.4. Modeling of Biosorption Process

Biosorption isotherms provided very useful data to understand the biosorption mechanism. Isotherm models were used to describe the behaviour of dye-biosorbent pairs. The Dubinin-Radushkevich (D-R), Langmuir, and Freundlich models were employed in this study to explore the interaction between RB5 dye molecules and the biosorbent surface of *Allium scorodoprasum L.* The parameters indicated in Table 2 have been calculated using the equations below for the biosorption isotherm models (Eq. 4, 5, 6, 7, and 8).

$$Q = \frac{X_L K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (4)$$

$$Q = K_F C_e^\beta \quad (5)$$

$$Q = X_{DR} e^{-K_{DR} \varepsilon^2} \quad (6)$$

$$\varepsilon = RT \ln \left(1 + \frac{1}{C_e} \right) \quad (7)$$

$$E_{DR} = (2K_{DR})^{-0.5} \quad (8)$$

Because of the emptiness of active centres on the *Allium scorodoprasum L.* biosorbent surface, RB5 dye biosorption effectiveness was shown to be high at low concentrations. At high concentrations, however, due to the filling of all active centres on the *Allium scorodoprasum L.* biosorbent surface, it decreased and eventually reached to an equilibrium. When the R^2 values from the Langmuir and Freundlich isotherm models were examined, the biosorption process fit the Langmuir isotherm model better. The Langmuir model predicts that the adsorbent surface's active sites are uniformly distributed [29].

The capacity of monolayer biosorption was discovered to be 19.8. mg g⁻¹. In Langmuir, it was 0.00525 L mg⁻¹. The Freundlich isotherm model is based on multilayer biosorption on heterogeneous surfaces and provides information on heterogeneity of the biosorbent surface. [30]. The Freundlich biosorption capacity was found to be X_F , 0.465, and the β surface heterogeneity was 0.563. The D-R model investigates the biosorption process in terms of energy [31]. The biosorption energy of RB5 dye was found to be 9.83. kJ mol⁻¹. Thus, this finding indicated that a chemical biosorption took place.

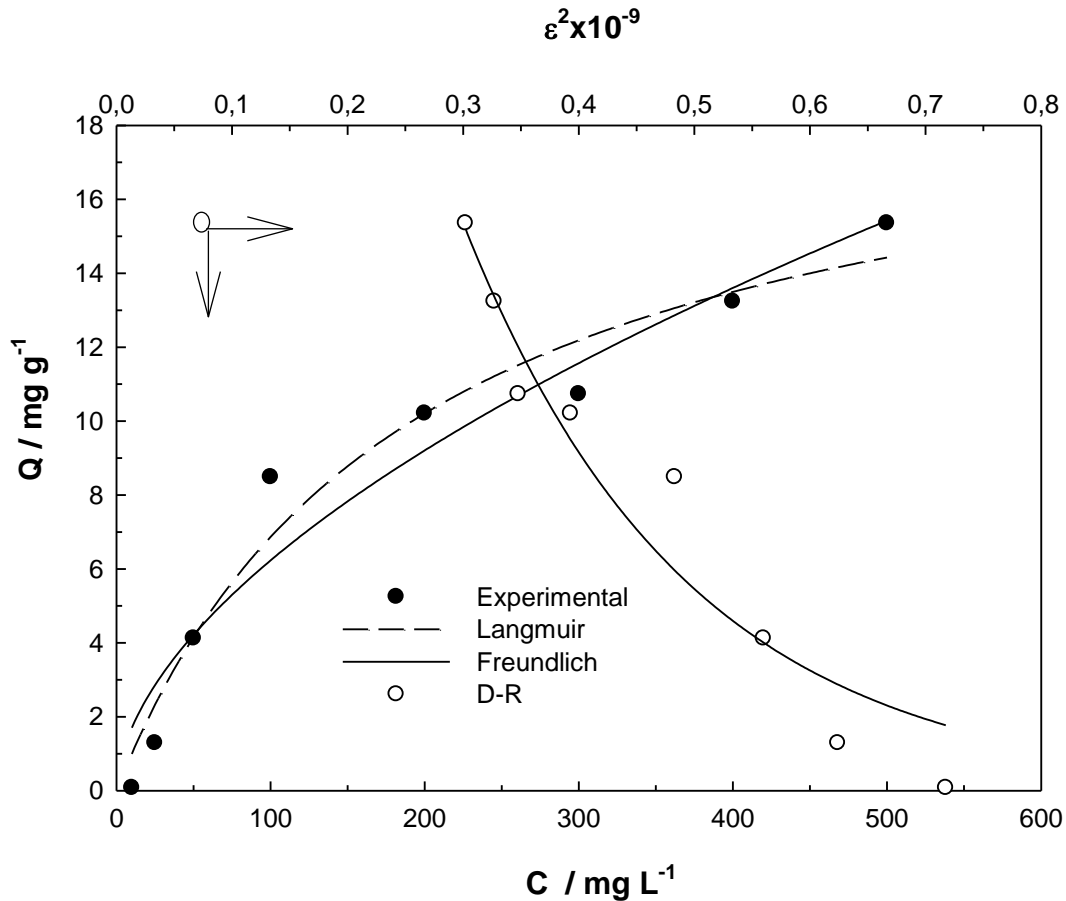


Figure 7. Langmuir, Freundlich and D-R models.

Table 2. Langmuir, Freundlich and D-R isotherm models parameters

Isotherm	Value	R ²
Langmuir		
X _L (mg g ⁻¹)	19.8	0.965
K _L (L mg ⁻¹)	0.00525	
Freundlich		
X _F	0.465	0.945
β	0.563	
D-R		
X _{DR} (mg g ⁻¹)	72.5	0.936
-K _{DR} × 10 ⁹ / mol ² K ⁻²	5.17	
E _{DR} / kJ mol ⁻¹	9.83	

3.5. Effect of contact time on biosorption

The kinetic study is crucial in finding the optimum interaction time of the *Allium scorodoprasum L.* biosorbent and the RB5 dye. To explain the RB5 dye biosorption kinetics of *Allium scorodoprasum L.* biosorbent, pseudo first order (PFO) [32] and pseudo second order kinetic models (PSO), [33], and intraparticle diffusion (IPD) [34] were applied and the kinetic parameters were derived using the following equations (Eq.9, 10, 11, 12, and 13)

$$Q_t = Q_e [1 - e^{-k_1 t}] \quad (9)$$

$$H_1 = k_1 Q_e \quad (10)$$

$$Q_t = \frac{1}{\left[\frac{1}{k_2 Q_e^2} \right] + \left[\frac{t}{Q_e} \right]} \quad (11)$$

$$H_2 = k_2 Q_e^2 \quad (12)$$

$$Q_t = k_i t^{0.5} \quad (13)$$

The RB5 dye biosorption reached equilibrium in 240 minutes (4 hours) (Figure 8). When the correlation coefficients (R^2) of the PFO and PSO models were examined, it was discovered that the PFO kinetic model fit the data better. Furthermore, the similarity between the theoretically estimated Q_t and practical Q_e values revealed in compliance with the PFO model. The presence of two line components in the IPD model graph rather than a single line passing through the origin indicated that biosorption encompassed various diffusion stages that occurred both on and inside the surface.

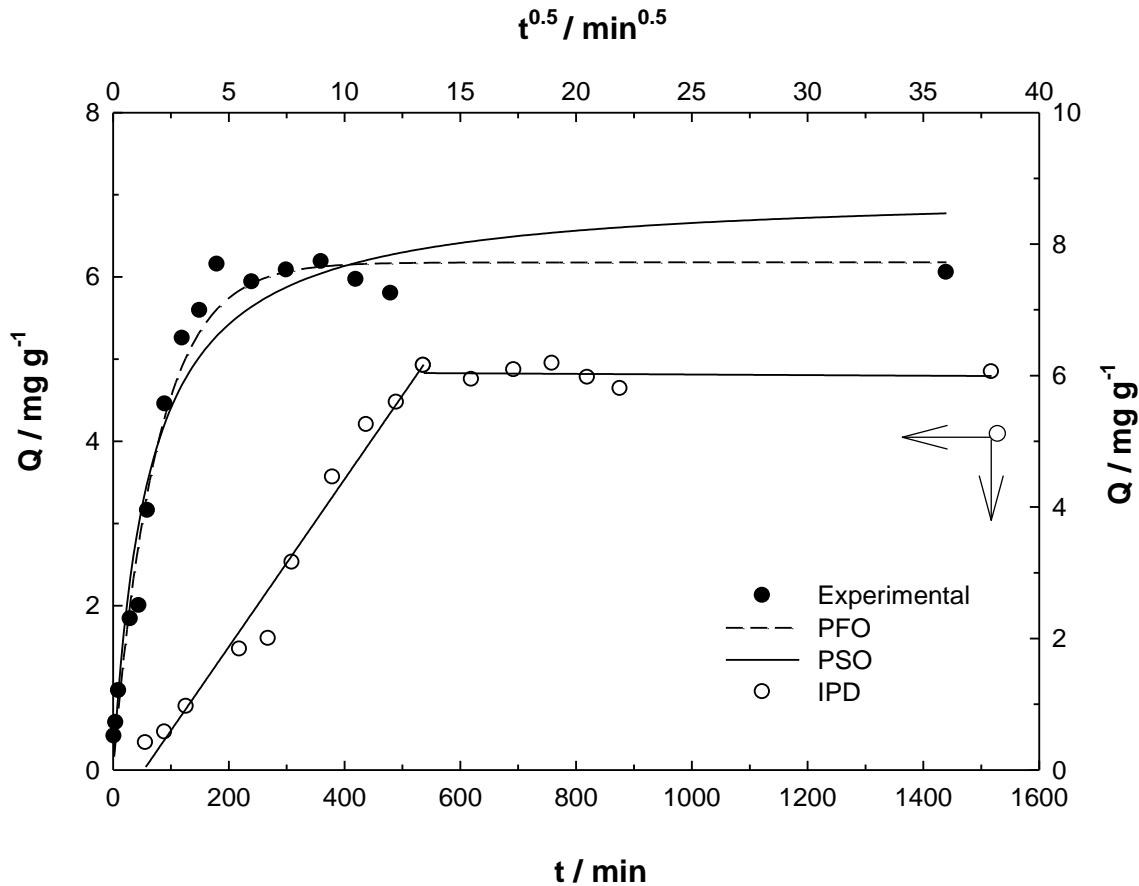


Figure 8. PFO, PSO and IPD models.

Table 3. PFO, PSO and IPD kinetic models parameters

Kinetic model	Value	R^2
Pseudo first order		
$Q_t/\text{mg g}^{-1}$	6.05	0.980
$Q_e/\text{mg g}^{-1}$	6.18	
$k_1 \times 10^3/\text{min}^{-1}$	13.2	
$H \times 10^3/\text{mg g}^{-1} \text{min}^{-1}$	81.6	
Pseudo second order		
$Q_t/\text{mg g}^{-1}$	6.05	0.950
$Q_e/\text{mg g}^{-1}$	7.06	
$k_2 \times 10^3/\text{mg}^{-1} \text{g min}^{-1}$	2.35	
$H \times 10^3/\text{mg g}^{-1} \text{min}^{-1}$	117	
Intra particle diffusion		
$k_i \times 10^3/\text{mg g}^{-1} \text{min}^{-0.5}$	676	0.977

3.6. Effect of temperature

In the process of the biosorption procedure, the thermodynamic parameters for RB5 dye biosorption to *Allium scorodoprasum* L biosorbent, namely free Gibbs energy (ΔG^0), enthalpy (ΔH^0), and entropy (ΔS^0) of biosorption can be evaluated using the equations given (Eq. 14,15 and 16).

$$K_D = \frac{Q}{C_e} \quad (14)$$

$$\Delta G^0 = -RT \ln K_D \quad (15)$$

$$\ln K_D = \frac{\Delta S^0}{R} - \frac{\Delta H^0}{RT} \quad (16)$$

The ΔH^0 value was determined to be 7.55 kJ mol⁻¹. The positive ΔH^0 value was proved that the biosorption process of RB5 dye molecules was endothermic. The value of entropy was found to be 58.2 J mol⁻¹ K⁻¹. In a solid-liquid system, the biosorption process led to the production of hydrated molecules. The positive ΔS^0 value showed a rise in a random interaction at the solid-liquid interface during the biosorption process. The ΔG^0 values were -8.6 kJ mol⁻¹, -9.2 kJ mol⁻¹, -9.8 kJ mol⁻¹, -10.7 kJ mol⁻¹ and -11.3 kJ mol⁻¹ at 5°C, 15°C, 25°C, 40°C, and 50°C, respectively. The decline in ΔG^0 value as temperature increased demonstrated that biosorption of RB5 dye molecules into *Allium scorodoprasum* L. biosorbent was possible, effective, and spontaneous at high temperature. According to the thermodynamic data, the RB5 biosorption process to the *Allium scorodoprasum* L biosorbent was spontaneous, endothermic, and increasing with entropy.

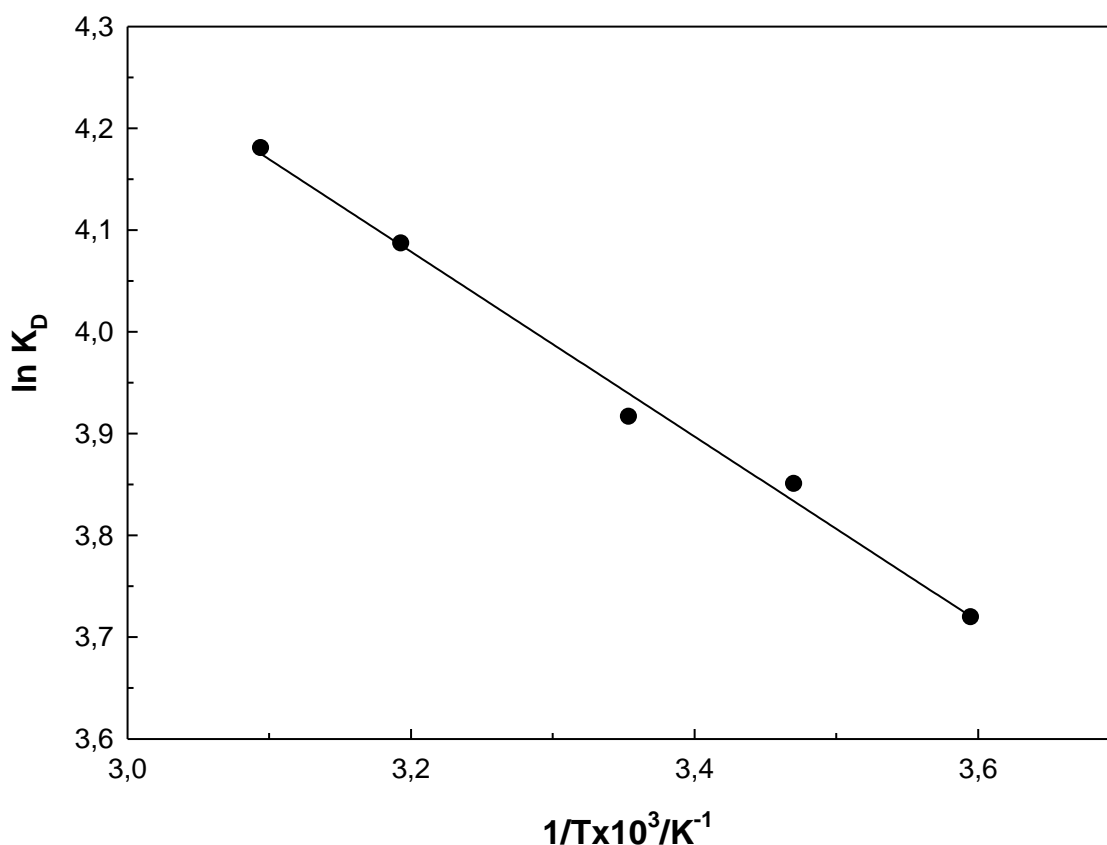


Figure 9. The effect of temperature on the biosorption

4. Discussion and Conclusion

In this study, the potential use of *Allium scorodoprasum* L. biomass as adsorbent for the bioremoval of RB5 dye from aqueous solutions. The results above discussed indicated that;

- The *Allium scorodoprasum* L. biosorbent and optimum reaction conditions for RB5 dye removal were determined for maximum biosorption as follows: natural dye pH, biosorbent mass: 100 mg, contact time 24 h, and temperature 25°C.
- The maximum biosorption capacity of the biosorbent for IC was found to be 19.8 mg g⁻¹ at 25 °C (R² values, Langmuir isotherm model). As a result, the Langmuir model best fit the results.
- The E_{DR}: 9.83 kJ mol⁻¹, indicated that the RB5 dye biosorption process to the *Allium scorodoprasum* L. biosorbent was chemical.
- The biosorption kinetic process followed the PFO and IPD kinetics.
- The thermodynamic properties indicate that the biosorption process is spontaneous and endothermic.
- The biosorbed RB5 on the surface of the *Allium scorodoprasum* L. biosorbent was also proven by FT-IR spectra and visualized by SEM.
- In light of all these findings, it was concluded that *Allium scorodoprasum* L. biomass can be used as an effective and alternative biosorbent for the removal of RB5 impurities from industrial wastewater.

References

- [1] Chaudhry, F.N. and M. Malik, *Factors affecting water pollution: a review*. J. Ecosyst. Ecography, 2017. **7**(1): p. 225-231.
- [2] Ajiboye, T.O., O.A. Oyewo, and D.C. Onwudiwe, *Simultaneous removal of organics and heavy metals from industrial wastewater: A review*. Chemosphere, 2021. **262**: p. 128379.
- [3] Namasivayam, C., D. Sangeetha, and R. Gunasekaran, *Removal of anions, heavy metals, organics and dyes [from water by adsorption onto a new activated carbon from Jatropha husk, an agro-industrial solid waste*. Process Safety and Environmental Protection, 2007. **85**(2): p. 181-184.
- [4] Khan, F.S.A., et al., *A comprehensive review on magnetic carbon nanotubes and carbon nanotube-based buckypaper for removal of heavy metals and dyes*. Journal of Hazardous Materials, 2021. **413**: p. 125375.
- [5] Palani, G., et al., *Current trends in the application of nanomaterials for the removal of pollutants from industrial wastewater treatment—a review*. Molecules, 2021. **26**(9): p. 2799.
- [6] Saini, R.D., *Textile organic dyes: polluting effects and elimination methods from textile waste water*. Int J Chem Eng Res, 2017. **9**(1): p. 121-136.
- [7] Carmen, Z. and S. Daniela, *Textile organic dyes-characteristics, polluting effects and separation/elimination procedures from industrial effluents-a critical overview*. Vol. 3. 2012: IntechOpen Rijeka.
- [8] Brillas, E. and C.A. Martínez-Huitle, *Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods. An updated review*. Applied Catalysis B: Environmental, 2015. **166**: p. 603-643.
- [9] Goyal, P., C.S. Tiwary, and S.K. Misra, *Ion exchange based approach for rapid and selective Pb (II) removal using iron oxide decorated metal organic framework hybrid*. Journal of Environmental Management, 2021. **277**: p. 111469.
- [10] Kariminiaae-Hamedani, H.-R., A. Sakurai, and M. Sakakibara, *Decolorization of synthetic dyes by a new manganese peroxidase-producing white rot fungus*. Dyes and Pigments, 2007. **72**(2): p. 157-162.
- [11] Priyan, V.V., et al., *Ecotoxicological assessment of micropollutant Diclofenac biosorption on magnetic sawdust: Phyto, Microbial and Fish toxicity studies*. Journal of Hazardous Materials, 2021. **403**: p. 123532.
- [12] Islam, A., et al., *Step towards the sustainable toxic dyes removal and recycling from aqueous solution-A comprehensive review*. Resources, Conservation and Recycling, 2021. **175**: p. 105849.
- [13] Kubra, K.T., M.S. Salman, and M.N. Hasan, *Enhanced toxic dye removal from wastewater using biodegradable polymeric natural adsorbent*. Journal of Molecular Liquids, 2021. **328**: p. 115468.
- [14] Paredes-Quevedo, L.C., et al., *Removal of a textile azo-dye (Basic Red 46) in water by efficient adsorption on [a natural clay*. Water, Air, & Soil Pollution, 2021. **232**: p. 1-19.
- [15] Shen, T., et al., *Single and simultaneous adsorption of basic dyes by novel organo-vermiculite: A combined experimental and theoretical study*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2020. **601**: p. 125059.
- [16] Largo, F., et al., *Adsorptive removal of both cationic and anionic dyes by using sepiolite clay mineral as adsorbent: Experimental and molecular dynamic simulation studies*. Journal of Molecular Liquids, 2020. **318**: p. 114247.
- [17] Shirazi, E.K., et al., *Removal of textile dyes from single and binary component systems by Persian bentonite and a mixed adsorbent of bentonite/charred dolomite*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2020. **598**: p. 124807.
- [18] Ngah, W.W., L. Teong, and M.M. Hanafiah, *Adsorption of dyes and heavy metal ions by chitosan composites: A review*. Carbohydrate polymers, 2011. **83**(4): p. 1446-1456.
- [19] Lee, S.-L., et al., *Sorption behavior of malachite green onto pristine lignin to evaluate the possibility as a dye adsorbent by lignin*. Applied Biological Chemistry, 2019. **62**: p. 1-10.

- [20] Göçenoğlu Sarıkaya, A., *Kinetic and thermodynamic studies of the biosorption of Cr (VI) in aqueous solutions by *Agaricus campestris**. Environmental Technology, 2021. **42**(1): p. 72-80.
- [21] Dalvi, V., et al., *Removal of pollutants from wastewater via biological methods and shifts in microbial community profile during treatment process*. Wastewater Treatment Reactors, 2021: p. 19-38.
- [22] Kumar, A., et al., *Biosorption: The removal of toxic dyes from industrial effluent using phyto biomass-A review*. Plant Arch, 2021. **21**: p. 1320-1325.
- [23] Tasci, B. and I. Koca. *Use of *Allium scorodoprasum* L. subsp. rotundum as food*. in VII International Symposium on Edible Alliaceae 1143. 2015.
- [24] Sheikh, Z., et al., *Potential application of *Allium Cepa* seeds as a novel biosorbent for efficient biosorption of heavy metals ions from aqueous solution*. Chemosphere, 2021. **279**: p. 130545.
- [25] Đorđevski, N., et al., *Chemical and Biological Investigations of *Allium scorodoprasum* L. Flower Extracts*. Pharmaceuticals, 2022. **16**(1): p. 21.
- [26] Demir, T., et al., *Phenolic profile and investigation of biological activities of *Allium scorodoprasum* L. subsp. rotundum*. Food Bioscience, 2022. **46**: p. 101548.
- [27] Cristóvão, R.O., et al., *Modeling the discoloration of a mixture of reactive textile dyes by commercial laccase*. Bioresource Technology, 2009. **100**(3): p. 1094-1099.
- [28] Peplowski, L., et al., *Vibrational spectroscopy studies of methacrylic polymers containing heterocyclic azo dyes*. Vibrational Spectroscopy, 2022. **120**: p. 103377.
- [29] Olawale, S.A. and O.O. Oluwasina, *Kinetics Studies for the Adsorption of Aqueous Cu (II) and Pb (II) Ions onto Chicken Feather*. Langmuir, 1918. **2**(W3): p. W2-W1.
- [30] Rajabi, M., et al., *Comparison and interpretation of isotherm models for the adsorption of dyes, proteins, antibiotics, pesticides and heavy metal ions on different nanomaterials and non-nano materials—a comprehensive review*. Journal of Nanostructure in Chemistry, 2023. **13**(1): p. 43-65.
- [31] Dubinin, M., *Modern state of the theory of gas and vapour adsorption by microporous adsorbents*. Pure and Applied Chemistry, 1965. **10**(4): p. 309-322.
- [32] Ho, Y.-S. and G. McKay, *Sorption of dye from aqueous solution by peat*. Chemical engineering journal, 1998. **70**(2): p. 115-124.
- [33] Ho, Y.-S. and G. McKay, *Pseudo-second order model for sorption processes*. Process biochemistry, 1999. **34**(5): p. 451-465.
- [34] Weber Jr, W.J. and J.C. Morris, *Kinetics of adsorption on carbon from solution*. Journal of the sanitary engineering division, 1963. **89**(2): p. 31-59.

Difference Sets from Quadratic Residues

Emek Demirci Akarsu*¹, Yasin Yılmaz*²

*¹ Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Matematik, RİZE

*² Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Matematik, RİZE

(Alınış / Received: 10.05.2023, Kabul / Accepted: 16.08.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 31.08.2023)

Keywords

Difference sets,
Quadratic residues,
QRCM Algorithm

Abstract: Difference sets are significant algebraic objects that intersect a collection of sub-areas of mathematics, such as field theory, combinatorics, number theory, and coding theory. They also have lots of application areas in other fields. The essential part of the subject is how to construct difference sets. This article proposes a new method, i.e., the Quadratic Residue Classes Method (QRCM), which produces difference sets by quadratic residue classes, and applies it to fields. The results show that QRCM successfully determines whether the quadratic residue class for a field is a difference set.

Kuadratik Rezidülerden Fark Kümesi Elde Etme

Anahtar Kelimeler

Fark Kümeleri,
Kuadratik Rezidüler,
QRCM Algoritması

Öz: Fark kümeleri cisim teorisi, kombinatorik, sayılar teorisi ve kodlama teorisi gibi matematiğin alt alanlarıyla kesişen önemli cebirsel ifadelerdir. Diğer alanlarda da birçok uygulama alanına sahiptirler. Fark kümelerinin nasıl oluşturulacağı konunun en önemli kısmıdır. Bu makale, kuadratik sınıflar tarafından fark kümeleri üreten ve bunu cisimlere uygulayan yeni bir yöntem, yani Kuadratik Rezidü Sınıfları Yöntemi (QRCM)ni önermektedir. Sonuçlar, QRCM'nin bir cisim için ikinci dereceden kuadratik rezidü sınıflarının bir fark kümesi olup olmadığını başarıyla belirlediğini göstermektedir.

*Corresponding Author, email: emek.akarsu@erdogan.edu.tr

1. Introduction

The concept of difference sets, a particular case of symmetric design, was first proposed by Singer in 1938 [1]. Later in 1940, Hall enriched the work on difference sets. As a result of the studies on the difference sets, the subject is branched into families of difference sets, such as almost difference sets, partial difference sets, etc. [2-5]. Since it is divided into branches and can be integrated into numerous application areas, coding and encryption, and interpretation of astronomical events [6], it has been a source of interest for many scientists until today.

Difference sets are a combinatorial structure in plenty of applications. Godsil and Roy [7] mentioned that the difference sets were used in quantum computing. In addition, Assmus and Key [8] examined the analysis applications of design on algebraic coding. For a difference set to exist, that structure must have a symmetrical design. On this symmetrical design entity, Bruck and Ryser proved the Bruck-Ryser - Chowla Theorem for symmetrical design with parameters (v, k, λ) [10]. This theorem, which was first proven for $\lambda \neq 1$, was later generalized for the case of positive numbers [11]. The first author also discusses the problem of difference sets and symmetric designs [10, 11]. The relation between quadratic residues and difference sets goes back to Lehmer [14, 15]. She proved that the class formed by quadratic residues on a field was a difference set. On top of these studies, McFarland showed that there was a family of difference sets on nonresidue classes too [16, 17]. Families of difference sets and for more details, see [18].

It is also known that difference sets have a good auto-correlation property. Explaining the formal duality of the Kerdock and Preparata codes is one of the outstanding results in applied algebra in the last few years [9]. The finding of several sets of four-phase sequences on \mathbb{Z}_4 with correlation qualities better than the best binary sequences is connected to this outcome. Furthermore, certain sets in cyclic groups' difference sets have qualities that are strongly connected to the correlation properties of sequences.

Many construction methods have been developed for difference sets, which have been extensively studied. One of these methods is quadratic residues. This study simulates an algorithm which we call by Quadratic Residue Classes Method (QRCM), by utilizing MATLAB R2022a and a laptop with Intel(R) Core (TM) i5 - 5200U, a 2.20Hz processor, and 4 GB of installed memory.

2. Material and Method

This section provides some of the basic definitions and properties used to be the following sections.

2.1. Difference Sets

This section presents the concept of difference sets [18] by considering the notations used in this paper.

Definition 2.1. [18] Let $(G,*)$ be a group of order v , D be a subset of G with k elements, " e " be the unit element of G , and $\lambda \in \mathbb{Z}^+$. If for all $g \in G \setminus \{e\}$, $|\{(d_i, d_j) : \exists d_i, d_j \in D, d_i \neq d_j \text{ and } d_i d_j^{-1} = g\}| = \lambda$, then D is called a (v, k, λ) -difference set over G .

Example 2.2. The set $D = \{0, 1, 5, 8, 10\}$ is a $(11, 5, 2)$ -difference set over the additive group \mathbb{Z}_{11} . Table 1 shows the generation of the elements of $\mathbb{Z}_{11} \setminus \{0\}$ obtained by using those of D under a frequency condition.

Table 1. Obtaining elements of $\mathbb{Z}_{11} \setminus \{0\}$ using those of D under a frequency condition

$\mathbb{Z}_{11} \setminus \{0\}$	$\lambda = 2$	
1	1 - 0	4 - 3
2	10 - 8	1 - 10
3	8 - 5	0 - 8
4	5 - 1	1 - 8
5	10 - 5	5 - 0
6	5 - 10	0 - 5
7	8 - 1	1 - 5
8	8 - 0	5 - 8
9	10 - 1	8 - 10
10	0 - 1	10 - 0

Theorem 2.3. [18] Let G be an abelian group and D be a (v, k, λ) -difference set over G , then

$$(v - 1)\lambda = k(k - 1).$$

The existence of this theorem does not always show that the structure is a difference set. For example, although this theorem is satisfied in $(111, 11, 1)$ -parameter projective space, it does not constitute a difference set. Let D be a subset of G be a (v, k, λ) -difference set. When translating of D by the elements of G , i.e., for $g \in G$, gD ($g + D$) and Dg ($D + g$) according to a multiplicative (additive) group, is also a (v, k, λ) -difference set.

2.2. Quadratic Residues

We, in this subsection, define a quadratic residue, an integer a that is a square modulo p , and give the concept and properties of quadratic residues. The work of the study of quadratic residues goes back to Euler, Legendre, and Gauss. The question in their mind is when an integer a is a perfect square modulo a prime p . Modular square root

problems are extensively related to quadratic residues with many application areas in cryptography, such as an interactive protocol demonstrating that a person has some secret information.

Definition 2.4. [19] Let p be an odd prime and $a \in \mathbb{Z}$ such that $(p, a) = 1$. If there is a solution to the congruent $x^2 \equiv a \pmod{p}$, then a is a quadratic residue in modulo p . If there is no solution in modulo p , then it is called the non-quadratic residue.

Lemma 2.5. [19] Let p be an odd prime and a be an integer not divisible by p . Then, the congruence $x^2 \equiv a \pmod{p}$ has either no solutions or exactly two incongruent solutions modulo p .

Lemma 2.5. heads to the main theorems about residues.

Theorem 2.6. [19] If p is an odd prime, then the number of quadratic residues of p is $(p - 1)/2$.

The following theorem also known as Paley difference sets is the main theorem of the article, which give rise to the relation between quadratic residues and difference sets with certain parameters.

Theorem 2.7. [19] (*Paley difference sets*) Let $p \in \mathbb{P}$ and $m \in \mathbb{N}$ such that $p^m \equiv 3 \pmod{4}$ be the power of an odd prime. Let G be the group of the finite field $GF(p^m)$ and $D \subset G$ be the sets of non-zero squares in $GF(p^m)$. Then, D is a $(p^m, \frac{p^m-1}{2}, \frac{p^m-3}{4})$ - difference set.

Example 2.8. In the group $(\mathbb{Z}_7, +)$, a subset $D = \{1, 2, 4\}$ of \mathbb{Z}_7 is a difference set. This difference set is a $(7, (7 - 1)/2, (7 - 3)/4)$ -Paley difference set for $q = 7$.

Theorem 2.9. [15] Let $p \in \mathbb{P}$ and x be an odd integer such that $p = 4x^2 + 1$, and $G = \mathbb{Z}_p$. Then, the set of the fourth power of every non-zero element of G is a difference set.

Example 2.10. Let us take $x = 3$ and $p = 4 \cdot 3^2 + 1 = 37$ as the form of an odd prime in the group \mathbb{Z}_{37} . Then, the set $D = \{1, 2, 7, 9, 10, 12, 16, 26, 33, 34\}$ of the fourth powers is a difference set with parameters $(37, 9, 2)$.

Theorem 2.11. [15] Let $p \in \mathbb{P}$ and x be an odd integer such that $p = 4x^2 + 9$, and $G = \mathbb{Z}_p$. Then, the set of the fourth power of every non-zero element of G is a difference set.

Example 2.12. Let p be prime as in the form of $p = 4 \cdot 1^4 + 9 = 13$ with $x = 1$ in the group \mathbb{Z}_{13} . Then, the subset $D = \{0, 1, 3, 9\}$ of the set of the fourth power of non-zero elements of \mathbb{Z}_{13} with parameters $(13, 4, 1)$ is a difference set.

3. Result

Here, it was checked whether the class obtained from the quadratic residues on the field $GF(q)$ on the MATLAB constituted a difference set with parameters $(r, \frac{r-1}{2}, \frac{r-3}{4})$. The method and its flowchart are as follows:

We are now ready to give the algorithm.

3.1. Difference Set Algorithm Obtained from Quadratic Residue Class

Step 1. Determine the size of the field $GF(q)$.

Step 2. Construct a vector consisting of the quadratic residue class of the field

$$(x_i)^2 \equiv 1 \pmod{q}. \tag{1}$$

Step 3. Figure out the number of elements of the quadratic residue class (k) on the field $GF(q)$

$$k = \frac{q-1}{2} \tag{2}$$

Step 4. A separate k^2 vector is obtained by taking the differences between each pair of points in the quadratic class $[x_i]_{1 \times k}$ where $i = 1, 2, 3, \dots, k$.

Step 5. A new vector of size $k^2 - k$ is created by taking the differences between the elements of the quadratic residue class in the vector. For $\forall i, j = 1, 2, 3, \dots, k$ and $i \neq j$, the following

$$[x_i - x_j]_{1 \times k^2 - k} \tag{3}$$

where $(x_i - x_j) \in GF(q)$, is obtained.

Step 6. A new vector is obtained by sorting the vector obtained in Step 5 from smallest to largest and reparametrizing it. For $= \frac{k(k-1)}{q-1} = \frac{q-3}{4}$, the following

$$[v_{s+\lambda(t-1)}]_{1 \times k^2 - k} \tag{4}$$

where $s = 1, 2, \dots, \lambda$ and $t = 1, 2, 3, \dots, q - 1$, is obtained.

Thus, it is seen how many times each element is repeated.

Step 7. For all $s = 1, 2, \dots, \lambda$ and $t = 1, 2, 3, \dots, q - 1$ the number of repetitions in Step 6 satisfies the condition $v_{s+\lambda(t-1)} = t$. In other words, if each element repeats λ times, then this structure is the difference set with the parameters $(r, (r - 1)/2, (r - 3)/4)$.

Step 8. If the repeats in Step 6 are unequal, it does not form a difference set.

The algorithm's flowchart is given in Figure 1 below.

4. Discussion and Conclusion

This study presents difference sets and quadratic residues, and discusses the connection between quadratic residues and difference sets. Moreover, the paper provides the results and running times for constructing difference sets provided by the QRCM algorithm. The results show that the quadratic residue class for a field is a difference set. The table below gives the program's running time for the MATLAB R2022a application for difference sets constructed from quadratic residues.

Table 2. Running time of the QRCM algorithm

(v, k, l)	Running time
(11,5,2)	0.001086
(19,9,4)	0.007533
(23,11,5)	0.007545
(31,11,7)	0.016996
(43,21,10)	0.02141
(47,23,11)	0.026246
(59,29,14)	0.029884
(67,33,16)	0.029931
(71,35,17)	0.036807
(79,39,19)	0.038065
(83,41,20)	0.047412
(103,51,25)	0.055755
(107,53,26)	0.058593

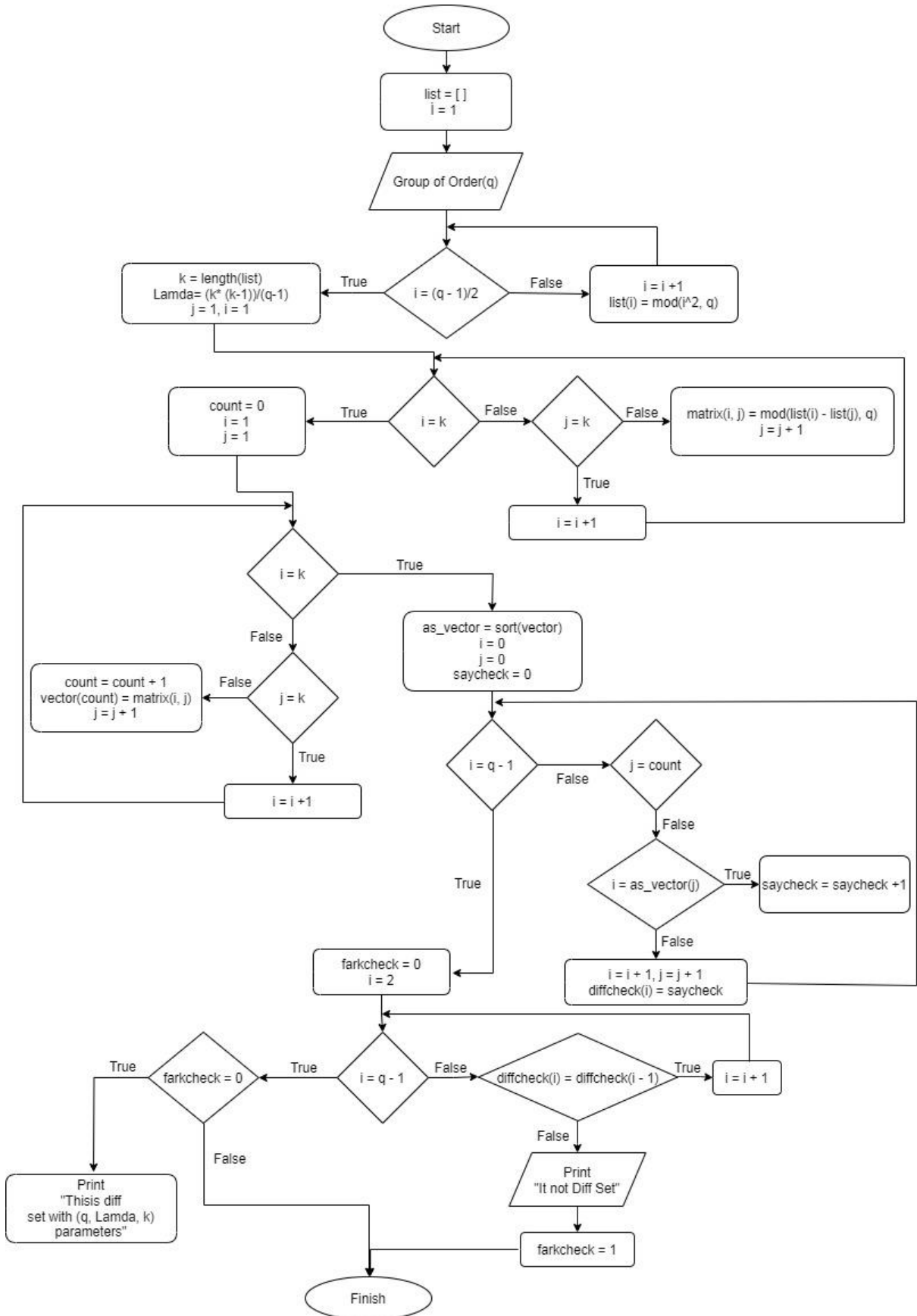


Figure 1. The Algorithm's Flowchart

We have seen that a difference set is a nontrivial specialization of symmetric design [11,13]. They give rise to several new combinatorial objects. Their properties are remarkably similar to those of the difference sets. A computer search for difference sets with small parameters has been conducted using these results.

Acknowledgment

All the authors contributed equally to this work. They all read and approved the last version of the manuscript. This work was derived from the second author's master's thesis supervised by the first author.

References

- [1] J. Singer, *A Theorem in Finite Projective Geometry and Some Applications to Number Theory*, Transactions of the American Mathematical Society 43(3) (1938), 377-385.
- [2] M. Hall, *Cyclic Projective Planes*, Duke Mathematical Journal 14(4) (1947), 1079-1090.
- [3] M. Hall, H. J. Ryser, *Cyclic Incidence Matrices*, Canadian Journal of Mathematics 3(1951), 495-502.
- [4] M. Hall, *The Theory of Groups*, California Institute of Technology, New York, 1959.
- [5] M. Hall, *A Survey of Difference Sets*, Proceedings of the American Mathematical Society 7(6) (1956), 975-986.
- [6] E. Demirci Akarsu, T. Navdar Günay. *Twin Prime Difference Set and Its Application on a Coded Mask*, Discrete Mathematics, Algorithms and Applications (2022), DOI:10.1142/S1793830922501427, In Press.
- [7] C. Godsil, A. Roy. *Equiangular lines, mutually unbiased bases, and spin models*, European Journal of Combinatorics 30 (2009), 246-162.
- [8] E. F. Assmus, J. D. Key. *Designs and Their Codes*, Cambridge University Press, Cambridge, 1992.
- [9] C. Ding, *Codes from Difference Sets*, Singapore: World Scientific, 2014.
- [10] S. Chowla, H.J. Ryser, *Combinatorial Problems*, Canadian Journal of Mathematics 2 (1950), 93-99.
- [11] H. J. Ryser, *The Existence of Symmetric Block Designs*, Journal of Combinatorial Theory A 32(1) (1982), 103-105.
- [12] E. Demirci Akarsu, S. Öztürk, *An Existing Problem for Symmetric Design: Bruck Ryser Chowla Theorem*, Sakarya University Journal of Science 26 (2) (2022), 241-248.
- [13] E. Demirci Akarsu, S. Öztürk, *The Existence Problem of Difference Sets*, Gümüşhane University Journal of Science and Technology, 12 (3) (2022), 917-922.
- [14] E. Lehmer, *On the Number of Solutions of $u^k + D \equiv w^2 \pmod{p}$* , Pacific Journal of Mathematics 5 (1955), 103 – 118.
- [15] E. Lehmer, *On Residue Difference Sets*, Canadian Journal of Mathematics 5 (1953), 425-432.
- [16] R. L. McFarland, *A Family of Difference Sets in Noncyclic Groups*, Journal of Combinatorial Theory A, 15(1) (1973), 1-10.
- [17] R. L. McFarland, B. F. Rice, *Translates and Multipliers of Abelian Difference Sets*, Proceedings of American Mathematical Society 68 (1978), 375-379.
- [18] E. H. Moore, H. S. Pollatsek, *Difference Sets: Connecting Algebra, Combinatorics, and Geometry*, Providence, RI: American Mathematical Society, 2013.
- [19] K. H. Rosen, *Elementary Number Theory and its Applications*, 5th Edition, Pearson Addison Wesley, USA (2005).

A Numerical Approach for Quantifying Bi-directional Interactions between Macro Economic Indicators and Construction Industry

Şaban Suat ÖZSARIYILDIZ*,^{ib}

*₁Nuh Naci Yazgan University, Faculty of Engineering - Civil Engineering Department, KAYSERİ

(Alınış / Received: 16.05.2023, Kabul / Accepted: 21.08.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 31.08.2023)

Keywords

Construction sector,
Macro-economic
indicators,
Construction prices,
Bi-directional
relations, XGBoost
Models, Sensitivity
analysis

Abstract: This article discusses a numerical approach for quantifying bi-directional interactions between economic indicators and the Turkish construction industry. The construction industry is a significant sector that has a substantial impact on economies, especially in terms of jobs and Gross domestic product (GDP). The article explores the relationship between the construction industry and macroeconomics, and uses macroeconomic models to analyze this relationship. The study focuses on Turkish construction industry and Turkish macro-economic datasets provided by Turkish Statistical Institute (TURKSTAT). The prediction model is constructed using Gradient Boosting algorithm, and sensitivity analysis based on improved Analytic Hierarchy Process (AHP) applied to capture model priority vector. The results show that some indicators can predict changes in construction prices, while others do not have predictive power. The article concludes by discussing the implications of these findings.

İnşaat Sektörü ve Makro Ekonomik Göstergeler Arasındaki Çift Yönlü Etkileşimleri Nicelleştirmek için Sayısal bir Yaklaşım

Anahtar Kelimeler

İnşaat sektörü,
Makro ekonomik
göstergeler, İnşaat
maliyet ve fiyatları,
Çift yönlü ilişkiler,
XGBoost modelleri,
Duyarlılık analizi

Öz: Bu makale, ekonomik göstergeler ve Türk inşaat sektörü arasındaki iki yönlü etkileşimleri nicelleştirmek için sayısal bir yaklaşımı tartışmaktadır. İnşaat sektörü, özellikle iş ve Gayri safi yurtiçi hasıla (GSYİH) açısından ekonomilere yüksek derecede etkili olan önemli bir sektördür. Makale, inşaat sektörü ve makroekonomi arasındaki ilişkiyi nicelleştirmek ve bu ilişkiyi analiz etmek için geliştirilen makroekonomik modelleri kullanmaktadır. Çalışma, Türk İnşaat Sektörü ve Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından sağlanan Türk makro-ekonomik veri setlerine odaklanmaktadır. Tahmin modeli, Gradyan Artırma algoritması kullanılarak oluşturulmuş ve model öncelik vektörünü hesaplamak için geliştirilmiş olan Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) temelli duyarlılık analizi yöntemi uygulanmıştır. Sonuçlar, bazı göstergelerin inşaat fiyatlarındaki değişiklikleri tahmin edebildiğini, diğerlerinin ise daha az tahmin gücüne sahip olduğunu göstermektedir. Makale, bu bulguların sonuçlarını tartışarak sona ermektedir.

*Corresponding Author, email: suat.ozsariyildiz@gmail.com

1. Introduction

Globally, the construction industry is generally regarded as a highly significant and substantial sector. This industry is concerned with the development and maintenance of structures such as houses, hospitals, offices, highways, bridges, and other structures, especially major government infrastructure projects [1,2,3].

The construction industry has a crucial part in shaping the economic landscape of a country. The government is a major customer of construction firms. In addition, construction is an investment in the economy and provides investment goods. The industrialization of construction was started in the 1960s and has grown in size since then and contains a large number of various sizes of construction companies.

The construction industry has a substantial impact on economies, especially by the means of jobs and Gross Domestic Product (GDP). The average percentage of jobs in this sector in Europe is 7%, although it ranges between 5% and 8% in Türkiye. For Türkiye, construction jobs were limited in 2020 due to the pandemic. The rates were at 5.75 percent and, construction turnover ranges from 12 to 16 percent of GDP, with an estimation of 11.9% in 2020. The number of construction companies are 12750 in total. They are distributed as; 99220 micro-scale, 23475 small-scale, 3869 mid-scale and 486 large-scale firms [4-7].

Additionally, comprehending potential trends in construction costs may influence the investment strategies of various stakeholders in the construction industry, such as private and public corporations, building companies, land investors, financial organizations, construction professionals and government policy makers [8,9].

The construction industry and the macroeconomy have a two-way relationship can be observed in nearly all aspects and phases of economic activity. This relationship can be divided into four main categories: demand and output, employment and income, balance of payments, and price levels [10]. These categories are interconnected in such a way that improvements in one area will eventually lead to changes in the others.

The word “macroeconomics” was created by Ragnar Frisch in the early 1930s to refer to the study of the economy as a whole [11]. The most crucial stage is to define the model’s working circumstances, which may be divided into three categories: identities or definitions, function relationships, and model boundaries. A challenge that confronts the field of economic analysis is its intricate nature. The mutual reliance of the elements of the system implies that a minor alteration in one element will entail repercussions or cascades of impacts of diverse magnitudes in most systems. Two major methods of simplification can be used. The first solution is to assume the potential result of a change in one variable while keeping all other variables unchanged except the effect of the change constant. The second principal technique of simplification is consolidation to examine the interconnections of all the primary components of the system simultaneously [12]. If the approach fails to tackle the issues of capital accumulation and disequilibrium arising from temporal discrepancies and error-corrections, it is unsuitable for realistic scenarios. These problems are more important to macro-theory and are treated less fully in standard texts.

In this paper, these dynamic analyses are prioritized over the timeless Keynesian system and important macroeconomic indicators for construction level of prices in Türkiye are derived in a nonlinear model. Alternatives models are developed for construction Economic Growth and Financial Markets [13,14]. Similarly, the indicators rely on two tentative methods both saddle points of the fundamental indicators in relation to construction level of price saddle points and predictive power of lags of the fundamental indicators. Other partial macro-economic models are proposed related to prices, development, sustainability, environment and housing development. [15-18] These models are not capable of dealing complexity of the whole construction sector as well as rarely focus on bidirectional relations. The analyses show that some things can tell us what will happen to construction prices before they change. These things are how many people are out of work, how much construction work is done, how much industry makes, and how prices and costs compare in manufacturing. Two other things change at the same time as construction prices. These are the cost of building and the total value of what the country makes. Some other things that we often look at in the economy did not help us predict construction prices. The interest rate, inflation rate, stock market index, and money supply are all factors to consider.

2. Material and Methods

This study focuses on Turkish construction industry and Turkish macro-economic datasets provided by TURKSTAT [19]. The prediction model is constructed using Gradient Boosting algorithm, a suitable machine-learning method for classification tasks. Sensitivity analysis is used to determine the model’s priority vector. This vector is then utilized to create and measure bi-directional relationships.

2.1. Macro-economic Reference Model

This research will narrow its focus to the model and the relation between the economy and the construction industry. The general model can be represented as in Equation 1. In the model Y represents the independent variables such as Construction Supply, Demand, etc. x_i represents the dependent variables for example interest rates, construction materials prices, etc. Details of the parameters are given Table 1. The β_0 represents the biases and β_n are the coefficients of the models. Four specific models Demand-Output, Employment-Incomes, Balance-of-Payments and finally in the Level-of-Prices are constructed using these parameters. These parameters will be used to quantify relationship between the economy and the construction industry.

$$Y_{A \rightarrow B} \cong Y_{A \leftarrow B} \text{ and } Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot x_i \quad (1)$$

2.2. The Data and Preprocessing

Turkish macro-economic datasets provided by TURKSTAT. The monthly data periods begin at January 1, 2000 and ends January 1, 2021. The main indicators used in models are given in Table 1. In accordance with the Pareto Principle, a statistical concept widely applied to explain various phenomena in human, machine, and environmental domains, 80% of the data was allocated for training purposes while the remaining 20% was utilized for validation.

Table 1. TURKSTAT indicators used in models

Model Parameters			
Interest Rate	Cru. Petroleum	C. Permission	Housing Num.
Bist100 Vol.	Producer PI	R. Permission	Housing Prices
Consumer PI	Employment	Budget Bal.	C. Employment
Ex. Rates Usd	Balance Pay.	C. Income	Interest Rate
Ex. Rates Eur	C. Materials P.	C. Output	Employment

The Table 1 contains a list of economic indicators. Crude petroleum, stone sand and clay, tubes pipes hollow profiles and related fittings of steel, and coke and refined petroleum products are some of the indicators that measure the performance of the energy sector. Consumer price index, producer price index, and construction materials are some of the indicators that measure the performance of the manufacturing sector. Employment, housing numbers, and construction employment are indicators that measure the performance of the labor market. The performance of the financial sector is measured by indicators such as interest rates and exchange rates. The construction sector’s performance is measured by indicators such as budget balance and balance.

Table 2. Summary statistics for various macroeconomic indicators

	Interest Rate	Bist100 Trading Volume	Consumer Price Index	Exchange Rates Usd	Exchange Rates Eur	Petroleum	Producer Price Index	Employment	Supply	Demand
count	252	252	252	252	252	252	252	252	252	252
mean	21.79	3790329	202.13	2.35	2.79	63.57	201.33	43.22	8480	7285
std	12.44	5830956	113.40	1.63	1.83	29.94	120.64	2.65	4506	3149
min	8.42	125799	31.59	0.55	0.55	14.85	28.87	37.30	1450	374
0.25	13.29	916484	115.42	1.40	1.75	39.10	118.73	41.30	5806	5279
0.5	17.28	2245164	177.83	1.60	2.13	59.78	173.37	43.18	8274	7021
0.75	26.08	3924601	264.13	2.86	3.17	81.34	250.14	45.27	10373	8984
max	59.30	39019692	504.81	8.02	9.47	138.40	568.27	48.35	45404	23268

Table 2 presents summary statistics for various macroeconomic indicators and commodities used in Macroeconomic – Construction Models. For example, the mean interest rate is 21.79 and the standard deviation is 12.44. The minimum interest rate is 8.42 and the maximum is 59.30. The 25th percentile is 13.29 and the 75th percentile is 26.08.

Table 3. Correlation coefficients for various macroeconomic indicators

	Interest Rate	Bist100 Trading Volume	Consumer Price Index	Exchange Rates Usd	Exchange Rates Eur	Petroleum	Producer Price Index	Employment
Interest Rate	1.00	0.03	0.14	0.30	0.29	-0.09	0.36	-0.01
Bist100 Trading Volume	0.03	1.00	0.09	0.15	0.11	-0.03	0.14	-0.08
Consumer Price Index	0.14	0.09	1.00	0.30	0.29	0.05	0.59	-0.07
Exchange Rates Usd	0.30	0.15	0.30	1.00	0.87	-0.07	0.57	-0.04
Exchange Rates Eur	0.29	0.11	0.29	0.87	1.00	0.00	0.58	0.01
Petroleum	-0.09	-0.03	0.05	-0.07	0.00	1.00	0.12	0.18
Producer Price Index	0.36	0.14	0.59	0.57	0.58	0.12	1.00	0.06
Employment	-0.01	-0.08	-0.07	-0.04	0.01	0.18	0.06	1.00

Table 3 shows the correlation coefficients between pairs of variables. The correlation values range from -1 to 1. A number of -1 indicates a perfect negative correlation, whereas a value of 1 indicates a perfect positive correlation. A value of 0 means there is no correlation. The diagonal values are always 1 because a variable is perfectly correlated with itself. For example, the correlation between Interest Rate and Bist100 Trading Volume is 0.03,

which indicates a very weak positive correlation. On the other hand, the correlation between Exchange Rates Usd and Exchange Rates Eur is 0.87, which indicates a strong positive correlation.

No macro model is sufficiently suitable for realistic scenarios if it fails to tackle the issues arising from temporal discrepancies and error-corrections. These dynamic analyses are prioritized over the timeless Keynesian system in this paper, as they are both more relevant to macro-theory and less explored in research. The proposed model used preprocessed data. The time-lags are log-normalized, other economic variables are normalized between 0 and 1 as well as corrected for stiffness and variations of variables in order to reduce model error and measuring scaled sensitivity. The output parameters binned to 5 classes for sensitivity analysis.

2.3. Macroeconomic – Construction Models and Methodology

A nonlinear Macroeconomic – Construction Models methodology, demand and output, employment and income, and balance of payments, as well as data analysis, the bi-directional relations of models and error rates are given in following sections. The price levels model is out of scope of this study.

2.3.1 Gradient Boosting Model

Gradient Boosting is a machine learning technique that uses many simple models to create a more accurate prediction model [20]. It can be used for both classification and regression tasks. The algorithm builds an ensemble of weak models in a stage-wise manner and allows for the optimization of any differentiable loss function. The aim is to interactively teach a model F to predict values of the form $\hat{y} = F(x)$ by minimizing the mean square error $\frac{1}{n} \sum_i (\hat{y}_i - y_i)^2$. This is done by calculating the difference between the predicted and actual values for each sample in the training set, where i is the indexes of training set and n is the number of samples in y . In addition, \hat{y}_i is the predicted value of $F(x_i)$ and y_i is the observed value. The algorithm with M weak estimators for each iteration $F_{m+1}(x_i) = F_m(x_i) + h_m(x_i) = y_i$ adds a new estimator to the imperfect model F_m to improve the error. The Mean-Squared-Error (MSE) loss with respect to $F(x_i)$ is calculated as in Equation 3. Gradient boosting optimizes prediction accuracy for various problems and provides a solution to multicollinearity. It allows for model design freedom and is an advantage over conventional fitting methods.

2.3.2 Bi-directional Relations of Models

In economic models the input-output table measures transactions and relations between industries in an economy [21]. An alternative model used in this study is the Analytic Hierarchy Process (AHP), which involves qualitative data and deals with uncertainty. AHP models provide mathematical means to associate relations and priorities of parameters. The AHP method computes the priority vector, ranking the importance of factors. The only inputs required are pair-wise comparisons of relative importance of factors [22].

The AHP approximates a matrix $A = (a_{ij})$, $(a_{ij}) = 1/a_{ji}$, $i, j = 1, \dots, n$ by a vector $W \in R_+^n$, where R_+^n so that the matrix of ratios is the best approximation (w_i/w_j) , $i, j = 1, \dots, n$ to the original matrix A . The eigenvector method $A.W = \lambda_{max}.W$ results in a priority vector $W \in R_+^n$ and an inconsistency number λ_{max} . The eigenvector method for AHP given in Equation 2.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Rather than employing an expert-provided judgment matrix as in the AHP model, Feature Importance derived from Gradient Boosting algorithms may be employed. One advantage of this approach is that it's easy to obtain importance scores for each attribute after constructing the weak models. This doesn't require complex expertise and can be derived from existing data. The significance of each attribute is determined by how much its split point enhances the performance metric, which is weighted by the number of observations for which the node is responsible. Each attribute has an impact on the performance of the node, and the significance of it is determined how much it enhances its performance. The final Macro-economic Reference Model is a linear model, thus approximating the XGBoost model F for a specific input x , the local accuracy gives the priority vector of the model to match the output of F for the simplified input x' . This priority vector can be used to define the coefficients of the reference model [23].

2.3.3 Model Validation

The model performance in terms of SoftMax error is used for defined model parameters. The given equations are provided to compute the above-mentioned factors as provided in Equation 3.

$$L_{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - F(x_i))^2 \tag{3}$$

2.4. Macroeconomic – Construction Demand and Output Model Application

Based on the methodology suggested in previous section a Construction Demand and Output Model developed. The model parameters Interest Rate, Bist100 Trading Volume, Consumer Price Index, Exchange Rates Usd, Exchange Rates Eur, Petroleum, Producer Price Index, Employment data is used as input given in Figure 1. The model output was *Supply and Demand* data.



Figure 1. Macroeconomic – Construction Demand and Output Model data

Table 4 shows the correlation coefficients between different economic indicators. A correlation coefficient is used to compute the magnitude and direction of a linear association between two parameters. Some of the strongest positive correlations in this table are between Exchange Rates USD and Exchange Rates EUR (0.87), and between Consumer Price Index and Producer Price Index (0.59). This means that when one of these indicators increases, the other is likely to increase as well. There are also some moderate positive correlations between Interest Rate and Producer Price Index (0.36), Exchange Rates USD and Producer Price Index (0.57), and Exchange Rates EUR and Producer Price Index (0.58). There are no strong negative correlations in this table. The strongest negative correlation is between Petroleum and Exchange Rates USD (-0.07), but this is still a very weak correlation. Overall, this table shows that some economic indicators are more closely related than others. For example, exchange rates seem to be more closely related to each other and to the Producer Price Index than to other indicators.

Table 4. Macroeconomic – Construction Demand and Output Model correlation coefficients

	Interest Rate	Bist100 Volume	Consumer Price Index	Exchange Rates Usd	Exchange Rates Eur	Petroleum	Producer Price Index	Employment	Supply	Demand
Interest Rate	1.00	0.03	0.14	0.30	0.29	-0.09	0.36	-0.01	0.02	0.03
Bist100 Vol.	0.03	1.00	0.09	0.15	0.11	-0.03	0.14	-0.08	-0.09	0.02
Consumer PI	0.14	0.09	1.00	0.30	0.29	0.05	0.59	-0.07	0.02	0.15
Ex. Rates Usd	0.30	0.15	0.30	1.00	0.87	-0.07	0.57	-0.04	-0.01	0.19
Ex. Rates Eur	0.29	0.11	0.29	0.87	1.00	0.00	0.58	0.01	0.00	0.15
Petroleum	-0.09	-0.03	0.05	-0.07	0.00	1.00	0.12	0.18	-0.01	0.12
Producer PI	0.36	0.14	0.59	0.57	0.58	0.12	1.00	0.06	0.00	0.26
Employment	-0.01	-0.08	-0.07	-0.04	0.01	0.18	0.06	1.00	0.02	-0.02
Supply	0.02	-0.09	0.02	-0.01	0.00	-0.01	0.00	0.02	1.00	0.26
Demand	0.03	0.02	0.15	0.19	0.15	0.12	0.26	-0.02	0.26	1.00

Many weak learners used in Construction Demand and Output Model in order to make a more accurate predictor. A sample week model is given in Figure 2. The accuracy of the final model is calculated by using Equation 3. The model's validation SoftMax accuracy is on average 75.21.

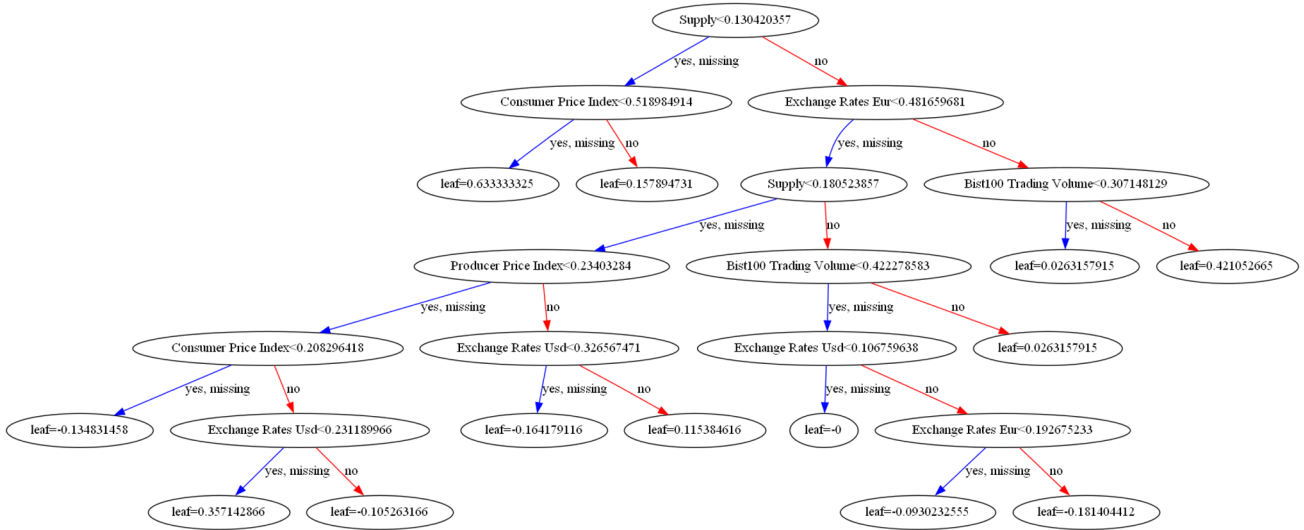


Figure 2. A sample boosting tree for Construction Demand and Output Model

The sample priority vector (Figure 3) of the given model by calculating the contribution of that feature to the prediction by comparing the prediction when all features in the model are present to the prediction. Based on this priority vector table in Figure 4 is formed.

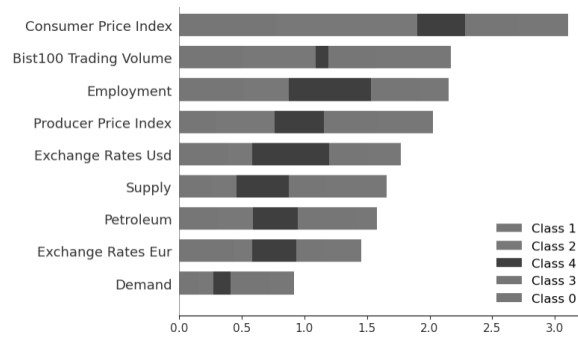


Figure 3. A sample Feature Importance vector for Macroeconomic – Construction Demand and Output Model

The reference model discussed at section 2.1 applied to Demand and Output model $Y_{Supply} \cong Y_{Demand}$ by using input and output parameters given above represented as x_i and the weights β_i both $Y_{Supply} = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot x_i$ and $Y_{Demand} = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot x_i$ models can be obtained using boosting model. The bidirectional relations given in below Figure 4 represents β_i . The upper triangular matrix gives β_i the weights of $Y_{Supply} \rightarrow Y_{Demand}$ and lower triangular matrix gives β_i the weights of $Y_{Supply} \leftarrow Y_{Demand}$ respectively.

	Interest Rate	Bist100 Trading Volume	Consumer Price Index	Exchange Rates Usd	Exchange Rates Eur	Petroleum	Producer Price Index	Employment	Supply	Demand
Interest Rate	1.00	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.13	0.13	0.08	0.07
Bist100 Trading Volume	0.10	1.00	0.10	0.09	0.10	0.11	0.13	0.09	0.08	0.08
Consumer Price Index	0.14	0.11	1.00	0.12	0.10	0.10	0.17	0.17	0.09	0.09
Exchange Rates Usd	0.13	0.12	0.11	1.00	0.29	0.11	0.12	0.09	0.10	0.09
Exchange Rates Eur	0.12	0.10	0.10	0.28	1.00	0.12	0.08	0.09	0.12	0.11
Petroleum	0.09	0.10	0.11	0.11	0.08	1.00	0.11	0.12	0.09	0.09
Producer Price Index	0.11	0.14	0.20	0.09	0.10	0.13	1.00	0.10	0.10	0.10
Employment	0.11	0.11	0.12	0.07	0.07	0.11	0.09	1.00	0.07	0.09
Supply	0.10	0.11	0.08	0.08	0.09	0.12	0.09	0.11	1.00	0.29
Demand	0.10	0.12	0.09	0.08	0.09	0.10	0.08	0.10	0.28	1.00

Figure 4. Bidirectional Macroeconomic – Construction Demand and Output Model weights

2.5. Macroeconomic – Construction Employment and Income Model Application

A Construction Employment and Income Model developed. The Interest Rate, Bist100 Trading Volume, Consumer Price Index, Exchange Rates Usd, Exchange Rates Eur, Petroleum, Producer Price Index, *Employment*, *Turnover*, *Costs*, *Income*, *Construction Balance* data is used as input and output given in Figure 5.



Figure 5. Construction Employment and Income Model data

From the Table 5, we can see that there is a moderate positive correlation between Turnover and Income (0.58), as well as between Construction Balance and Income (0.48). There is also a weak positive correlation between Costs and Employment (0.09). On the other hand, there is a weak negative correlation between Employment and Turnover (-0.21), as well as between Employment and Construction Balance (-0.11). The correlations between the other indicators you mentioned are close to 0, indicating little to no correlation.

Table 5. Construction Employment and Income Model correlation coefficients

	Int. Rate	Bist 100 Vol.	Cons. PI	Ex. Rates Usd	Ex. Rates Eur	Petro-leum	Producer PI	Employment	Turn-over	Costs	Income	Cons. Balance
Interest Rate	1.00	0.03	0.14	0.30	0.29	-0.09	0.36	-0.01	0.02	0.03	-0.01	-0.03
Bist100 Vol.	0.03	1.00	0.09	0.15	0.11	-0.03	0.14	-0.08	-0.09	0.02	-0.14	-0.10
Consumer PI	0.14	0.09	1.00	0.30	0.29	0.05	0.59	-0.07	0.02	0.15	-0.12	-0.09
Ex. Rates Usd	0.30	0.15	0.30	1.00	0.87	-0.07	0.57	-0.04	-0.01	0.19	-0.04	-0.01
Ex. Rates Eur	0.29	0.11	0.29	0.87	1.00	0.00	0.58	0.01	0.00	0.15	-0.06	-0.02
Petroleum	-0.09	-0.03	0.05	-0.07	0.00	1.00	0.12	0.18	-0.01	0.12	0.05	-0.05
Producer PI	0.36	0.14	0.59	0.57	0.58	0.12	1.00	0.06	0.00	0.26	-0.10	-0.10
Employment	-0.01	-0.08	-0.07	-0.04	0.01	0.18	0.06	1.00	0.02	-0.02	-0.02	-0.11
Turnover	0.02	-0.09	0.02	-0.01	0.00	-0.01	0.00	0.02	1.00	0.26	0.58	0.26
Costs	0.03	0.02	0.15	0.19	0.15	0.12	0.26	-0.02	0.26	1.00	0.04	-0.03
Income	-0.01	-0.14	-0.12	-0.04	-0.06	0.05	-0.10	-0.02	0.58	0.04	1.00	0.48
Con. Balance	-0.03	-0.10	-0.09	-0.01	-0.02	-0.05	-0.10	-0.11	0.26	-0.03	0.48	1.00

A sample week Construction Employment and Income model is given in Figure 6. The accuracy of the final model is calculated by using Equation 3. The model’s validation SoftMax accuracy is on average 75.21. The priority vector represented in Figure 7 of the given model by calculating the contribution of that feature to the prediction by comparing the prediction when all features in the model are present to the prediction. Based on this priority vector table in Figure 8 is formed.

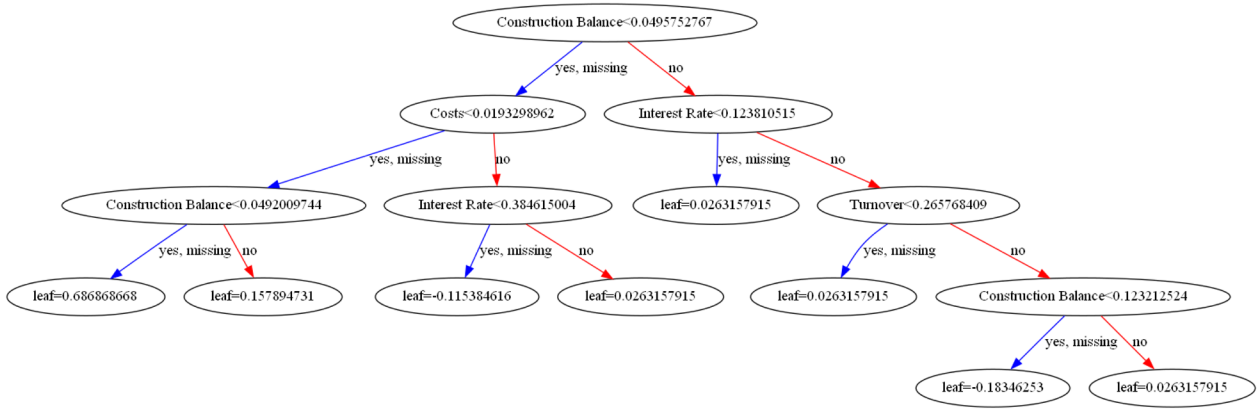


Figure 6. A sample boosting tree for Construction Employment and Income Model

The for Construction Employment and Income Model $Y_{\text{Employment}} \cong Y_{\text{Income}}$ by using input and output parameters given above represented as x_i and the weights β_i both $Y_{\text{Employment}} = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot x_i$ and $Y_{\text{Income}} = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot x_i$ models can be obtained using boosting model. The bidirectional relations given in below Table 3 represents β_i . The upper triangular matrix gives β_i the weights of $Y_{\text{Employment}} \rightarrow Y_{\text{Income}}$ and lower triangular matrix gives β_i the weights of $Y_{\text{Employment}} \leftarrow Y_{\text{Income}}$ respectively.

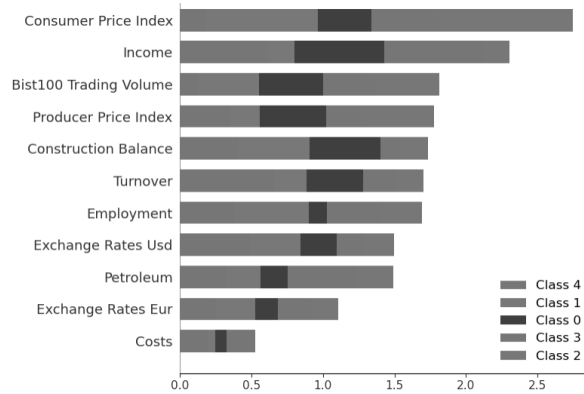


Figure 7. A sample Feature Importance vector for Construction Employment and Income Model

The priority vector (Figure 7) of the given model by calculating the contribution of that feature to the prediction by comparing the prediction when all features in the model are present to the prediction. Based on this priority vector table is formed given in Figure 8.

	Interest Rate	Bist100 Trading Volume	Consumer Price Index	Exchange Rates Usd	Exchange Rates Eur	Petroleum	Producer Price Index	Employment	Turnover	Costs	Income	Construction Balance
Interest Rate	1.00	0.09	0.08	0.07	0.05	0.07	0.10	0.09	0.05	0.10	0.07	0.04
Bist100 Trading Volume	0.08	1.00	0.07	0.06	0.07	0.08	0.09	0.06	0.08	0.07	0.03	0.04
Consumer Price Index	0.12	0.09	1.00	0.09	0.07	0.09	0.15	0.15	0.14	0.07	0.03	0.04
Exchange Rates Usd	0.12	0.09	0.10	1.00	0.26	0.08	0.10	0.06	0.07	0.07	0.03	0.05
Exchange Rates Eur	0.08	0.10	0.06	0.23	1.00	0.09	0.09	0.05	0.08	0.08	0.07	0.04
Petroleum	0.07	0.09	0.07	0.10	0.08	1.00	0.08	0.09	0.07	0.05	0.03	0.03
Producer Price Index	0.09	0.09	0.19	0.08	0.08	0.10	1.00	0.07	0.07	0.05	0.06	0.05
Employment	0.10	0.10	0.08	0.08	0.06	0.08	0.07	1.00	0.12	0.09	0.05	0.02
Turnover	0.08	0.11	0.11	0.07	0.09	0.10	0.09	0.18	1.00	0.17	0.06	0.07
Costs	0.09	0.10	0.07	0.11	0.07	0.12	0.11	0.10	0.13	1.00	0.17	0.13
Income	0.10	0.10	0.08	0.06	0.11	0.10	0.08	0.10	0.07	0.07	1.00	0.47
Construction Balance	0.08	0.05	0.09	0.04	0.05	0.08	0.04	0.05	0.13	0.17	0.42	1.00

Figure 8. Bidirectional Construction Employment and Income Model weights

2.6. Macroeconomic – Construction Balance of Payments Model Application

A Construction Balance of Payments Model developed. The Interest Rate, Bist100 Trading Volume, Consumer Price Index, Exchange Rates Usd, Exchange Rates Eur, Petroleum, Producer Price Index, Turnover, Construction Balance, Income, Construction Employment data is used as input and output given in Figure 11.

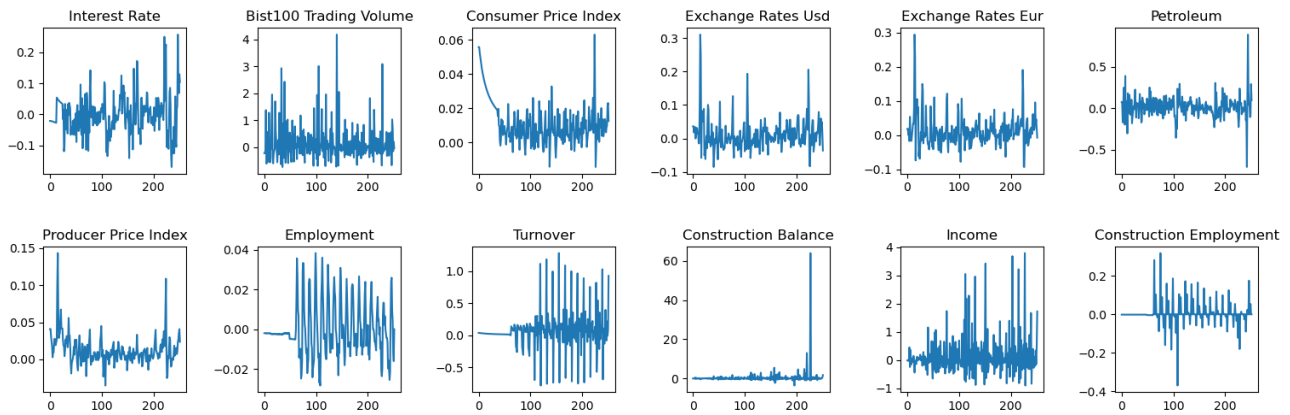


Figure 11. Construction Balance of Payments Model data

From the Table 6, we can see that there is a strong positive correlation between Employment and Construction Employment (0.54). There is also a moderate positive correlation between Turnover and Income (0.58), as well as between Construction Balance and Income (0.48). On the other hand, there is a weak negative correlation between Employment and Turnover (-0.21), as well as between Employment and Construction Balance (-0.11). The correlations between the other indicators you mentioned are close to 0, indicating little to no correlation.

Table 6. Macroeconomic – Construction Balance of Payments Model correlation coefficients

	Int. Rate	Bist100 Vol.	Consumer PI	Ex. Rates Usd	Ex. Rates Eur	Petro-leum	Producer PI	Employment	Turnover	Con. Balance	Income	Con. Employ.
Int. Rate	1.00	0.03	0.14	0.30	0.29	-0.09	0.36	-0.01	-0.01	-0.03	-0.01	0.05
Bist100 Vol.	0.03	1.00	0.09	0.15	0.11	-0.03	0.14	-0.08	-0.21	-0.10	-0.14	-0.19
Consumer PI	0.14	0.09	1.00	0.30	0.29	0.05	0.59	-0.07	-0.13	-0.09	-0.12	-0.08
Ex.Rates Usd	0.30	0.15	0.30	1.00	0.87	-0.07	0.57	-0.04	0.01	-0.01	-0.04	-0.07
Ex.Rates Eur	0.29	0.11	0.29	0.87	1.00	0.00	0.58	0.01	0.00	-0.02	-0.06	-0.01
Petroleum	-0.09	-0.03	0.05	-0.07	0.00	1.00	0.12	0.18	-0.03	-0.05	0.05	0.04
Producer PI	0.36	0.14	0.59	0.57	0.58	0.12	1.00	0.06	-0.07	-0.10	-0.10	0.02
Employment	-0.01	-0.08	-0.07	-0.04	0.01	0.18	0.06	1.00	0.04	-0.11	-0.02	0.54
Turnover	-0.01	-0.21	-0.13	0.01	0.00	-0.03	-0.07	0.04	1.00	0.26	0.58	0.24
Con. Balance	-0.03	-0.10	-0.09	-0.01	-0.02	-0.05	-0.10	-0.11	0.26	1.00	0.48	0.00
Income	-0.01	-0.14	-0.12	-0.04	-0.06	0.05	-0.10	-0.02	0.58	0.48	1.00	0.04
Con. Empl.	0.05	-0.19	-0.08	-0.07	-0.01	0.04	0.02	0.54	0.24	0.00	0.04	1.00

A sample week Construction Balance of Payments model is given in Figure 12. The accuracy of the final model is calculated by using Equation 3. The model's validation SoftMax accuracy is on average 75.21. The priority vector given in Figure 13 of the given model by calculating the contribution of that feature to the prediction by comparing the prediction when all features in the model are present to the prediction. Based on this priority vector table in Figure 14 is formed.

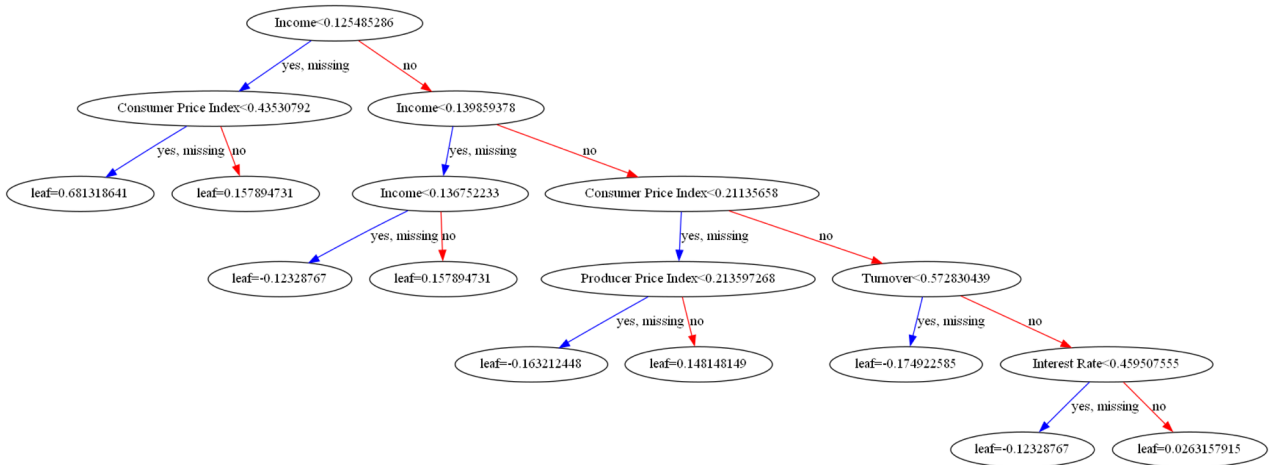


Figure 12. A sample boosting tree for Macroeconomic – Construction Balance of Payments Model

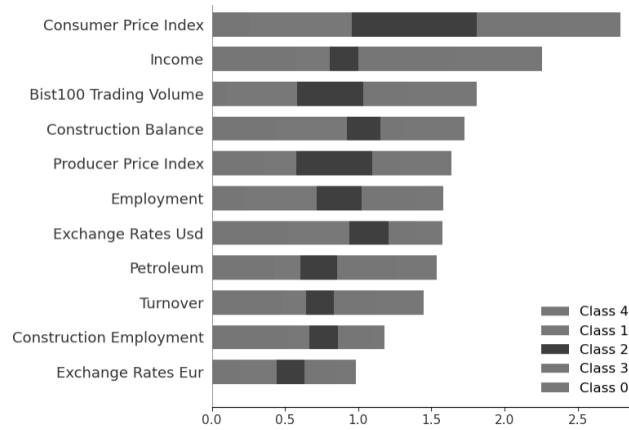


Figure 13. A sample Feature Importance vector for Construction Balance of Payments Model

The for Construction Balance of Payments Model $Y_{Balance} \cong Y_{Turnover}$ by using input and output parameters given above represented as x_i and the weights β_i both $Y_{Balance} = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot x_i$ and $Y_{Turnover} = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot x_i$ models can be obtained using boosting model. The bidirectional relations given in below Table 3 represents β_i . The upper triangular matrix gives β_i the weights of $Y_{Balance} \rightarrow Y_{Turnover}$ and lower triangular matrix gives β_i the weights of $Y_{Balance} \leftarrow Y_{Turnover}$ respectively.

	Interest Rate	Bist100 Trading Volume	Consumer Price Index	Exchange Rates Usd	Exchange Rates Eur	Petroleum	Producer Price Index	Employment	Turnover	Construction Balance	Income	Construction Employment
Interest Rate	1.00	0.07	0.06	0.08	0.04	0.08	0.10	0.05	0.05	0.05	0.08	0.05
Bist100 Trading Volume	0.08	1.00	0.06	0.07	0.08	0.09	0.08	0.07	0.07	0.03	0.05	0.04
Consumer Price Index	0.12	0.08	1.00	0.10	0.06	0.10	0.14	0.11	0.13	0.06	0.04	0.08
Exchange Rates Usd	0.12	0.08	0.07	1.00	0.23	0.07	0.11	0.06	0.07	0.05	0.03	0.06
Exchange Rates Eur	0.07	0.09	0.07	0.23	1.00	0.09	0.09	0.06	0.06	0.04	0.06	0.05
Petroleum	0.08	0.09	0.07	0.09	0.07	1.00	0.10	0.07	0.07	0.05	0.04	0.04
Producer Price Index	0.08	0.09	0.15	0.09	0.07	0.09	1.00	0.06	0.05	0.05	0.03	0.08
Employment	0.08	0.09	0.08	0.07	0.06	0.08	0.08	1.00	0.07	0.05	0.06	0.19
Turnover	0.09	0.11	0.11	0.08	0.08	0.11	0.09	0.13	1.00	0.07	0.06	0.18
Construction Balance	0.07	0.08	0.08	0.05	0.08	0.09	0.05	0.05	0.12	1.00	0.48	0.10
Income	0.09	0.08	0.05	0.07	0.10	0.09	0.07	0.10	0.06	0.47	1.00	0.13
Construction Employment	0.10	0.13	0.20	0.07	0.13	0.11	0.08	0.25	0.26	0.09	0.07	1.00

Figure 14. Bidirectional Macroeconomic – Construction Balance of Payments Model weights

3. Results

In a free market economy, building supply and demand are interdependent and serve as the primary determinants of one another. This relationship is confirmed through this study, with a bidirectional correlation between building supply and demand being the most significant parameter (28-29%). Energy is a crucial input for developing countries to achieve their economic growth targets. However, non-renewable energy sources constitute a significant portion of the energy mix. As such, the relationship between building supply and demand and oil prices

is noteworthy. Given that oil is a primary raw material in building construction and the production of building materials, there exists a strong correlation between these variables.

In Türkiye, the relationship between building supply and demand and the exchange rate in the construction sector is significant. When considering the factors that influence construction prices, companies often opt to price housing in Euros. Per se, a 12% correlation was found between building supply and the Euro exchange rate. Similarly, an 11% correlation was found between building demand and the Euro exchange rate. This is primarily attributed to expatriate citizens residing in EU member countries seeking to purchase housing in their home countries. In the income and employment model, analogous to the supply and demand model, the relationship between the Euro and construction income is a notable parameter. Given that construction income prices are denominated in Euros, fluctuations in the Euro exchange rate directly impact income.

A positive and upward trend in the BIST 100 index positively impacts building supply and demand. This is due to increased participation from foreign investors in the stock market, which bolsters confidence in the country's economy and stimulates additional investments and demand in the housing sector. Analysis confirms this relationship, with an 11% correlation between building supply and the BIST 100 index and a 12% correlation between building demand and the BIST 100 index. Furthermore, an increase in building supply is known to drive up labor demand. In this context, similar to the BIST 100 results, an increase in building supply positively affects employment (11%) and reduces unemployment. As with the supply and demand model, the BIST 100 index is influential in the income and employment model (10%). As previously stated, developments in the BIST 100 index positively affect construction income and employment.

A 10% correlation has been observed between building demand and the producer price index (PPI). An increase in housing demand is expected to drive up the housing stock, leading to increased demand and prices for building materials, thereby affecting the PPI. In another model, the income and employment model, a 15% correlation was determined between the consumer price index (CPI) and employment. As such, an increase in the CPI will drive up construction prices, which in turn will impact employment through an increase in building supply.

In the income and employment model, interest rates and costs are influential factors. Fluctuations in interest rates directly impact both construction income (10%) and employment (10%), as changes in interest rates are considered the most significant development in both the establishment and sale of buildings. Decreases in interest rates, a key economic indicator, stimulate housing demand and subsequently increase housing supply. Conversely, rising costs lead to a decrease in income (17%) and a corresponding decrease in employment (9%). The inverse of this relationship is also theoretically valid.

In the income and employment model, the income-expenditure balance is the most influential parameter (42%) affecting construction income. Turnover is the most significant parameter (18%) impacting employment. Based on these results, a Construction Balance model was estimated. Analysis revealed that Income (48%), Turnover (12%), Euro, BIST and CPI (8%), Oil prices (9%), and Interest rates (7%) are all correlated with construction balance. The strong relationship between the balance of payments and construction income is expected. The relationship between economic outcomes and parameters expressed in previous models was also found to be valid within this model.

4. Discussion and Conclusions

This paper discusses the bi-directional interactions between economic indicators and the Turkish construction industry that shapes the economic landscape of a country and has a substantial impact on economies through jobs and GDP. The paper developed nonlinear macroeconomic models and data from the Turkish Statistical Institute to analyze the relationship between the construction industry and the economy. The study focuses on three main categories: demand and output, employment and income, and balance of payments. The proposed model is using a machine learning technique called gradient boosting. Gradient boosting is a nonlinear method that builds an ensemble of weak models in a stage-wise manner and allows for the optimization of any differentiable loss function. The advantage of using a nonlinear method is that it can capture complex and nonlinear relationships between the variables, which may not be possible with linear methods. The paper also uses sensitivity analysis to determine the priority vector of the model, which represents the relative importance of each variable in the model. This helps to quantify and measure the bi-directional relations between the economic indicators and the construction sector. The results show correlations between various economic indicators and the construction industry. Some key findings of the study are also discussed in details such as interest rates, exchange rates, oil prices, BIST 100 index, CPI, PPI, and the construction industry in terms of supply and demand, income, employment, balance of payments, and price levels.


Acknowledgment

None declared.

References

- [1] Zheng, S., & Liu, H. 2004. Interaction among construction investment, other investment and GDP in China. *Tsinghua Science and Technology*, 9(2), 160-167.
- [2] European Commission. 2014. Infrastructure in the EU: Developments and Impact on Growth. *European Economy. Occasional Papers*, No. 203.
- [3] Pekbaş, M. Ö. 2008. Türkiye İçin Kamu Altyapı Yatırımı Harcamalarının Büyüme Üzerine Etkileri. *Planlama Uzmanlığı Tezi*, T. C. Kalkınma Bakanlığı, Ankara.
- [4] Kapelko, M., Lansink, A. O., Stefanou, S. E. 2014. Assessing dynamic inefficiency of the Spanish construction sector pre-and post-financial crisis. *European Journal of Operational Research*, 237(1), 349-357.
- [5] World Bank. 2022. Turkey Overview: Development news, research, data. (2022.06.07). <https://www.worldbank.org/en/country/turkey/overview#3>
- [6] Mordor Intelligence. 2022. Turkey construction market size & share analysis - growth trends & forecasts 2023 - 2028. (2022.06.07). <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/turkey-construction-market>.
- [7] Wells, J. 1985. The role of construction in economic growth and development, *Habitat International*, 9(1), 55-70.
- [8] Statista. 2022. Construction industry in Turkey - statistics & facts. (2022.06.07) <https://www.statista.com/topics/5190/construction-industry-in-turkey/#topicOverview>
- [9] Giang, D.T.H., Pheng, L.S. 2011. Role of construction in economic development: Review of key concepts in the past 40 years. *Habitat International*. Volume 35, Issue 1, Pages 118-125.
- [10] Hillebrandt, P.M. 2005. *Economic Theory and the Construction Industry*, Springer Nature.
- [11] Allen, R. G. D. 1967. *Macro-Economic Theory: A Mathematical Treatment*, Palgrave Macmillan.
- [12] Pheng LS, Hou LS. 2019. The Economy and the Construction Industry. *Construction Quality and the Economy*. 2019 Jan 9:21-54.
- [13] Kaya, V., Yalçınkaya, Ö., Huseyni, İ. 2013. Role of Construction Sector in Economic Growth: The Case of Turkey (1987-2010) , *Atatürk University Journal of Economics and Administrative Sciences*, 27(4), 148-168.
- [14] Polat M. A., Fendoğlu E., 2021. Effects of The Construction Sector on Economic Growth and Financial Markets: The Case of Turkey. *Business and Economics Research Journal*. 12(3).2021. 575-598.
- [15] Alkay, E., Watkins, C., Öveç, G. 2019. Economic Indicators And Housing Development: Regional Based Exploratory Analysis In Turkey . *Marmara Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Dergisi* , 41 (1) , 1-22.
- [16] Tanyılmaz, K., Karahan, M. 2021. Kalkınma ve inşaat sektörü: Türkiye örneği . *Ardahan Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi* , 3 (1) , 62-68 .
- [17] Bayram, S. 2018. Trend Analysis of Final Construction Prices: The Turkish Case. *Journal of Engineering Technology and Applied Sciences* , 3 (2) , 107-117.
- [18] Kuzu Yıldırım, S. 2019. The Construction Sector And Economic Growth: A Sustainable Relationship? . *Ekonomik Ve Sosyal Araştırmalar Dergisi* , 15 (1) , 85-94.
- [19] Turkish Statistical Institute. 2022. Macroeconomic statistics. (2022.06.07). <https://www.tuik.gov.tr/en/>
- [20] Chen, T, Guestrin, C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. 2016. New York, NY, USA: ACM; 2016. p. 785-94.
- [21] Eurostat. 2008. Eurostat manual of supply, use and input-output tables. Office for Official Publications of the European Communities.
- [22] Gass S.I., Rapcsák T. 2004. Singular value decomposition in AHP. *European Journal of Operational Research*.
- [23] Lundberg, Scott M., Su-In Lee. 2017. A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems*.

Fractional Mathematical Modelling of The Spread of Rotavirus Disease

*Fatma Özköse 

†Erciyes Üniversitesi Fen Fakültesi Matematik Bölümü, KAYSERİ

(Alınış / Received: 09.06.2023, Kabul / Accepted: 07.08.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 31.08.2023)

Keywords

Fractional order derivative,
Stability,
Numerical solutions,
Numerical simulation,
Existence-uniqueness

Abstract: In this study, rotavirus disease is examined. In this situation, many variables are used to construct a fractional mathematical model. The model is employed to determine how the disease's transmission will affect susceptible, infected, and recovered individuals. The implications of the fractional derivative on the stability and dynamic behaviour of solutions are examined using the formulation of the Caputo fractional operator. The existence and uniqueness, positivity and boundedness of the solution are next examined. Findings include equilibrium points and stability requirements.

Numerical simulations are used to examine the system's dynamic behaviour. With the use of these simulations, it is possible to study how susceptible, infected, and recovered people change over time by giving fractional values to fractional order ϑ . ϑ takes values in the range $[0,1]$. This highlights the advantages of using fractional differential equations. Then it is seen how changing some parameters causes changes in susceptible, infected and recovered individuals.

Rotavirüs Hastalığının Yayılımının Kesirli Matematiksel Modellemesi

Anahtar Kelimeler

Kesirli mertebeden türev,
Kararlılık,
Sayısal çözümler,
Sayısal benzetimler,
Varlık-teklik

Öz: Bu çalışmada rotavirüs hastalığı incelenmiştir. Bu durumda, kesirli bir matematiksel model oluşturmak için birçok değişken kullanılır. Model, hastalığın bulaşmasının duyarlı, enfekte ve iyileşmiş bireyleri nasıl etkileyeceğini belirlemek için kullanılır. Kesirli türevin çözümlerin kararlılığı ve dinamik davranışı üzerindeki etkileri, Caputo kesirli operatörünün formülasyonu kullanılarak incelenir. Daha sonra çözümün varlığı ve tekliği, pozitifliği ve sınırlılığı incelenir. Bulgular, denge noktalarını ve kararlılık gereksinimlerini içerir.

Sayısal benzetimler, sistemin dinamik davranışını incelemek için kullanılır. Bu benzetimlerin kullanımıyla, ϑ kesirli mertebesine kesirli değerler vererek duyarlı, enfekte ve iyileşmiş insanların zaman içinde nasıl değiştiğini incelemek mümkündür. ϑ , $[0,1]$ aralığında değerler alır. Bu, kesirli diferansiyel denklemleri kullanmanın avantajlarını vurgular. Daha sonra bazı parametrelerin değiştirilmesinin duyarlı, enfekte ve iyileşmiş bireylerde nasıl değişikliklere neden olduğu görülür.

*Corresponding Author, email: fpeker@erciyes.edu.tr

1. Introduction

Rotaviruses are the leading cause of diarrhea in infants and young children, especially severe gastroenteritis, which causes hospitalizations and infant deaths worldwide [1]. The disease constitutes an average of 20% of all diarrhea-related deaths in the world [2]. Rotavirus is a virus that causes intestinal inflammation, especially in children under 2 years of age. The disease is manifested by severe fever, diarrhea, and vomiting. The transmission route of the disease is oral - fecal route. The disease makes epidemics, especially in winter and spring. [2, 3]. Due to rotavirus (RV) diarrhea, there are approximately twenty five million outpatient clinic applications worldwide every year, two million children are hospitalized and more than 600,000 children are lost [4]. In other words, one child is lost every minute due to RV gastroenteritis. Rotaviruses take the second place after pneumococci among vaccine-preventable disease deaths in children under five years of age [5]. Studies show that rotavirus is an important cause of gastroenteritis in children aged 0-5 years in our country [6-9]. Rotavirus diarrhea is a problem of both developed and developing countries all over the world. Rotavirus infections, which differ from other gastroenteritis agents by not being dependent on socioeconomic conditions and hygiene measures, are seen with the same frequency in developed and developing countries; while it progresses with high mortality in developing countries, it results in high morbidity and economic losses in developed countries [6,10,11]. Mızrakçı [12] and Aydın [13] conducted studies on Rotavirus. Examining the development and course of epidemic diseases is of great importance in terms of diagnosis and treatment. Mathematical models are used because there is no mechanism to completely eliminate the disease. Therefore, mathematical models have become necessary diagnostic and therapeutic tools for treatment. Since 1927, mathematical models have been extensively employed to understand the course of disease. Recently, scientists have worked on fractional differential equations when creating mathematical models. The classical concepts of derivative and integral, which Leibniz and Newton both fully investigated, are generalised by the fractional derivative and integral. Both the ideas of fractional derivative and integral are historically significant [14]. In addition to Leibniz, many mathematicians such as Weyl, Liouville, Lagrange, Riemann Laplace, Fourier, Abel and Euler have done various studies on this subject [15]. Various definitions of the fractional derivative have been made in the literature. Some of these are Caputo, Riemann-Liouville, Grünwald-Letnikov, Riesz, Wely fractional derivatives. Some studies have shown that these definitions are the same under certain conditions. Although there are transitions between them, their definitions and physical interpretations are different [16-19]. It is possible to select the derivative definition most appropriate for the type of issue at hand and so arrive at the optimum solution by using several definitions of derivatives in fractional analysis. The Caputo definition of the fractional derivative is created by the Italians. In the 1960s, the mathematician Riemann-Liouville eliminated the problem of calculating or experimentally measuring the initial values that arose in applications of the Laplace transform of the M. Caputo definition. For this reason, in some recent studies in the literature, fractional derivative operators are preferred more than Caputo and Riemann-Liouville fractional derivative operators for numerical and analytical solutions of fractional differential equations. The Caputo derivative employs fractional derivatives. Let's give examples from the studies on the mathematical modeling of some diseases in recent years employing the Caputo fractional derivative: Öztürk et al. [20] examined the stability of the fractional-order model of the tumor-immune system interaction. Naik et al. [21] created a dynamic fractional-order HIV-1 model that takes into account interactions between cancer cells, healthy lymphocytes, and lymphocytes that have been virus-infected to cause chaotic behaviour. Özköse et al. [22] used the Caputo fractional derivative to study the long-term impact of treatment on tumour cells and stem cells. Özköse et al. [23] conducted several studies on a new fractional grade model of SARS-CoV-2 and Cholera disease with real data. Yavuz et al. [24] conducted several studies on a new fractional rank and susceptibility analysis modeling for hepatitis-b disease with real data. Sabbar et al. [25] conducted various studies on the general epidemic model in their study called Logistic Growth, Quarantine Strategy, Media Attack and Quadratic Perturbation, and Infection Eradication Criteria in the General Outbreak Model. Sene et al. [26] demonstrated the theory and applications of the fractional chaotic system by using the Caputo operator in her work called Theory and Applications of the New Fractional Chaotic System Under the Caputo Operator. Evirgen et al. [27] carried out studies on the modeling of influenza disease dynamics under the Caputo-Fabrizio fractional derivative with different contact rates. Veerasha et al. [28] studied the Korteweg-De Vries equation with three fractional operators in his work A computational approach for shallow water forced the Korteweg-De Vries equation at critical flow over a hole with three fractional operators. Odionyenma et al. [29] analyzed a model using the Caputo derivative in her study Analysis of a model for controlling the joint dynamics of Chlamydia and Gonorrhoea using the Caputo fractional derivative. Atede et al. [30] studied a fractional grade vaccination model for COVID-19 involving environmental transmission: A case study using Nigerian data, using Nigerian data on a fractional grade vaccination model. Nwajeri et al. [31] examined the mathematical modeling of malaria and cholera disease with the help of fractional differential equations in her study named co-dynamic model analysis furnished with fractional differential equations of malaria and cholera. The model's formulation is described first, after which the model's existence and uniqueness are demonstrated. It has been shown that the parameters that will control the spread of the disease are determined by the fundamental reproduction number and equilibrium points. The article's sections are arranged in the following order: The most significant definitions of fractional calculus are covered in Section 2. In Section 3, we describe a fractional order

model. In Section 4, we show that the solution to this model exists and is unique. We identify the equilibrium points of the model's solution and evaluate their stability in Section 5. We find positivity and boundedness in Section 6. In Section 7, we present the numerical technique for this model. In Section 8, we utilise the parameter values from Table 1 to numerically solve our model using the Adams-Bashforth Moulton approach. Finally, Section 9 provides the conclusion.

2. Preliminaries

We give a few key definitions of fractional calculus [16,25] that are crucial to understanding this text in this part.

Definition 1. Fractional integral from order ϑ is described as

$$I^\vartheta f(t) = \int_0^t \frac{(t-s)^{\vartheta-1}}{\Gamma(\vartheta)} f(s) ds,$$

where $\vartheta > 0, t > 0$ and Γ is the Gamma function, the fractional derivative is described as

$$D^\vartheta f(t) = I^{n-\vartheta} D^n f(t) \left(D = \frac{d}{dt} \right),$$

where $\vartheta \in (n-1, n), t > 0$.

Definition 2.

$$\begin{aligned} {}_0^C D_t^\vartheta f(t) &= \frac{1}{\Gamma(n-\vartheta)} \int_0^t \frac{\left(\frac{d}{d\tau}\right)^n f(\tau)}{(t-\tau)^{\vartheta-n+1}}, & 0 \leq n-1 < \vartheta < n, & \quad n = [\vartheta], n \in N, \\ & \left(\frac{d}{dt} \right)^n f(t), & \vartheta = n, n \in N. \end{aligned} \tag{1}$$

gives the definition of the Caputo fractional derivative of order $\vartheta > 0$ of $f: (0, \infty) \rightarrow \mathcal{R}$.

Definition 3. The Laplace transform (LT) of the Caputo operator of the function $f(t)$ of order $\vartheta > 0$ is described by

$$L[{}_0^C D_t^\vartheta f(t)] = s^\vartheta F(s) - \sum_{v=0}^{n-1} f^{(v)}(0) s^{\vartheta-v-1} f^{(v)}(0). \tag{2}$$

Definition 4. The Laplace transform (LT) of the function $f(t) = t^{\vartheta_1-1} E_{\vartheta, \vartheta_1}(\pm wt^\vartheta)$ is described as

$$L[t^{\vartheta_1-1} E_{\vartheta, \vartheta_1}(\pm wt^\vartheta)] = \frac{s^{\vartheta-\vartheta_1}}{s^\vartheta \pm w}, \tag{3}$$

where $E_{\vartheta, \vartheta_1}$ is Mittag-Leffler function.

Definition 5. The gamma function is defined for $Re(z) > 0$

with the help of the integral

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty e^{-t} t^{z-1} dt.$$

One of the gamma function's fundamental characteristics is

$$\Gamma(z + 1) = z\Gamma(z),$$

$$\Gamma(n + 1) = n!$$

for $z \in \mathbb{C}, n \in N_0$. The gamma function has singular poles at $z = -n (n = 0, 1, 2, \dots)$.

Theorem 1 [32,33]. Consider the following fractional order system:

$$\frac{d^\vartheta X}{dt^\vartheta} = f(X), \quad X(0) = X_0, \tag{4}$$

with $X \in \mathcal{R}^n$ and $\vartheta \in (0, 1]$. The equilibrium points of the system (4) are solutions to the equation $f(X^*) = 0$, and these equilibrium points:

- (1) Asymptotically stable \Leftrightarrow all the eigenvalues $\lambda_i, i = 1, 2, \dots, n$ of the Jacobian matrix $J(X^*)$ satisfy that $|\arg(\lambda_i)| > \frac{\vartheta\pi}{2}$.
- (2) Stable \Leftrightarrow it is asymptotically stable or the eigenvalues $\lambda_i, i = 1, 2, \dots, n$ of $J(X^*)$ that satisfy $|\arg(\lambda_i)| = \frac{\vartheta\pi}{2}$ if have the same geometric multiplicity and algebraic multiplicity.
- (3) Unstable \Leftrightarrow eigenvalues λ_i for some $i = 1, 2, \dots, n$ of $J(X^*)$ satisfy $|\arg(\lambda_i)| < \frac{\vartheta\pi}{2}$.

3. Mathematical Modelling

Mathematical models can be used to forecast the occurrence and severity of viral infections. Many diseases may be treated and their spread halted using mathematical models. Our aim is to monitor the spread of the disease with the help of these mathematical models and to help science by observing the effect of this disease on people. Rotavirus disease, which has spread since 2003, has been causing the death of many people every year. To examine the spread of rotavirus, we consider three subpopulations susceptible, rotavirus-infected, and recovered. S stands for a susceptible person, I rotavirus-infected person, R the population that has recovered, and N total population. The recommended fractional order model is as follows:

$$\begin{aligned} D^\vartheta S(t) &= \Lambda - \beta_1 \frac{S(t)I(t)}{N} - \mu S(t), \\ D^\vartheta I(t) &= \beta_1 \frac{S(t)I(t)}{N} - \mu I(t) - \alpha_2 I(t) - \alpha_3 I(t), \\ D^\vartheta R(t) &= \alpha_2 I(t) - \mu R(t). \end{aligned} \tag{5}$$

with initial settings

$$S(0) = S_0 \geq 0, I(0) = I_0 \geq 0, R(0) = R_0 \geq 0.$$

The biological effects of the system (5) parameter values are presented in the following Table.

Parameters	Meaning	Value	Source
Λ	Recruitment rate	2.2996e+03	[32]
μ	The natural death rate	0.0336080229	Estimated
α_2	The rate of people recovered from the I class	0.008841	Estimated
α_3	Death rate of disease	0.024	[33]
β_1	Rate of disease transmission	0.3736	[33]

Rotavirus disease is an infectious disease like covid 19 and shows a similar spread. SIR mathematical modeling is used in both of these diseases. Therefore, parameter values can be taken the same. The article for covid 19 is an extended version of the SIR model.

4. Existence and Uniqueness

Let us assess the system (5) under its initial settings $S(0) = S_0, I(0) = I_0, R(0) = R_0$.

The formula for the system (5) is:

$$D^\theta X(t) = B_1 X(t) + S(t)B_2 X(t) + I(t)B_3 X(t) + V,$$

$$X(0) = X_0, \tag{6}$$

where

$$X(t) = \begin{pmatrix} S(t) \\ I(t) \\ R(t) \end{pmatrix}, X(0) = \begin{pmatrix} S(0) \\ I(0) \\ R(0) \end{pmatrix},$$

$$B_1 = \begin{pmatrix} -\mu & 0 & 0 \\ 0 & -\mu - \alpha_2 - \alpha_3 & 0 \\ 0 & \alpha_2 & -\mu \end{pmatrix}, B_2 = \begin{pmatrix} 0 & \frac{-\beta_1}{N} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, B_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{\beta_1}{N} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, V = \begin{pmatrix} \Lambda \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Definition 7 [33]. Let $C^*[0, \tau^*]$ be the class of continuous column $X(t)$ whose components $S, I, R \in C^*[0, \tau^*]$ are the class of continuous functions on the interval $[0, \tau^*]$. The norm of $X \in C^*[0, \tau^*]$ is given by

$$\|X\| = \sup_t |e^{-Nt} S(t)| + \sup_t |e^{-Nt} I(t)| + \sup_t |e^{-Nt} R(t)|,$$

where N is a natural number and when $t > \delta \geq m$, we write $C_\delta^*[0, \tau^*]$ and $C_\delta[0, \tau^*]$.

Definition 8 [33]. $X \in C^*[0, \tau^*]$ is a solution of IVP (6) if

- (1) $(t, X(t)) \in D, t \in [0, \tau^*]$ where $D = [0, \tau^*] \times K, K = \{(S, I, R) \in \mathcal{R}_+^3: |S| \leq p, |I| \leq r, R \leq w\}$,
 $p, r, w \in \mathcal{R}_+$ are constants.
- (2) $X(t)$ satisfies (6).

Theorem 2. The unique solution for the initial value problem (6) is $X \in C^*[0, \tau^*]$.

Proof: Given the fractional calculus's inherent features, the equation in (6) may be expressed as

$$I^{1-\vartheta} \frac{d}{dt} X(t) = B_1 X(t) + S(t) B_2 X(t) + I(t) B_3 X(t) + V.$$

Operating by I^ϑ we achieve

$$X(t) = X(0) + I^\vartheta (B_1 X(t) + S(t) B_2 X(t) + I(t) B_3 X(t) + V). \tag{7}$$

Let us now $F: C^*[0, \tau^*] \rightarrow C^*[0, \tau^*]$ described by

$$FX(t) = X(0) + I^\vartheta (B_1 X(t) + S(t) B_2 X(t) + I(t) B_3 X(t) + V). \tag{8}$$

Then

$$\begin{aligned} e^{-Nt} \|FX - FY\| &= e^{-Nt} I^\vartheta \left(B_1(X(t) - Y(t)) + S(t) B_2(X(t) - Y(t)) + I(t) B_3(X(t) - Y(t)) \right) \\ &\leq \left| \frac{1}{\Gamma(\vartheta)} \int_0^t (t-s)^{\vartheta-1} e^{-N(t-s)} (X(s) - Y(s)) e^{-Ns} ds \right| (B_1 + pB_2 + rB_3) \\ &\leq (B_1 + pB_2 + rB_3) \left| \frac{1}{\Gamma(\vartheta)} \int_0^t (u)^{\vartheta-1} e^{-N(u)} \right| \|X - Y\| \\ &\leq \frac{(B_1 + pB_2 + rB_3) \left| \frac{\gamma(\vartheta, Nt)}{\Gamma(\vartheta)} \right|}{N^\vartheta} \|X - Y\|, \end{aligned}$$

where $\gamma(\vartheta, Nt)$ is the lower incomplete gamma function and $u = t - s$. Since N is an arbitrary, we accept that

$N^\vartheta \geq B_1 + pB_2 + rB_3$, then we get $\|FX - FY\| \leq \|X - Y\|$. Operator F in (8) has a fixed point. As a result, (7) has a unique solution, $X \in C^*[0, \tau^*]$.

In (7), we have

$$\begin{aligned} X(t) &= X(0) + \frac{t^\vartheta}{\Gamma(\vartheta + 1)} (B_1 X(0) + S(0) B_2 X(0) + I(0) B_3 X(0)) \\ &\quad + I^{\vartheta+1} (B_1 X'(t) + S'(t) B_2 X(t) + S(t) B_2 X'(t) + I'(t) B_3 X(t) + I(t) B_3 X'(t)). \end{aligned}$$

$$e^{-Nt}X'(t) = e^{-Nt} \frac{t^\vartheta}{\Gamma(\vartheta)} (B_1X(0) + S(0)B_2X(0) + I(0)B_3X(0) + V) \\ + I^\vartheta (B_1X'(t) + S'(t)B_2X(t) + S(t)B_2X'(t) + I'(t)B_3X(t) + I(t)B_3X'(t)).$$

The assumption $X' \in C_\delta^*[0, \tau^*]$. From (7) we have

$$\frac{dX(t)}{dt} = \frac{d}{dt} I^\vartheta (B_1X(t) + S(t)B_2X(t) + I(t)B_3X(t) + V).$$

Operating by $I^{1-\vartheta}$ we get

$$I^{1-\vartheta} \frac{dX(t)}{dt} = I^{1-\vartheta} \frac{d}{dt} I^\vartheta (B_1X(t) + S(t)B_2X(t) + I(t)B_3X(t) + V).$$

$$D^\vartheta X(t) = (B_1X(t) + S(t)B_2X(t) + I(t)B_3X(t) + V),$$

and

$$X(0) = X_0 + I^\vartheta (B_1X(t) + S(t)B_2X(t) + I(t)B_3X(t) + V).$$

As a result, IVP (6) and Equation (7) are equal.

5. Equilibria and Their Stabilities:

The formula for system (5) to determine the equilibrium points is:

$$\Lambda - \beta_1 \frac{S(t)I(t)}{N} - \mu S(t) = 0, \\ \beta_1 \frac{S(t)I(t)}{N} - \mu I(t) - \alpha_2 I(t) - \alpha_3 I(t) = 0, \tag{9}$$

$$\alpha_2 I(t) - \mu R(t) = 0.$$

We achieve the equilibrium point after simplification, where

$$S = \frac{N(\mu + \alpha_2 + \alpha_3)}{\beta_1}, \\ I = \frac{(-N\mu^2 - N\mu\alpha_2 - N\mu\alpha_3 + \Lambda\beta_1)}{(\mu\beta_1 + \alpha_2\beta_1 + \alpha_3\beta_1)}, \\ R = \frac{-\alpha_2(N\mu^2 + N\mu\alpha_2 + N\mu\alpha_3 - \Lambda\beta_1)}{\mu^2\beta_1 + \mu\alpha_2\beta_1 + \mu\alpha_3\beta_1},$$

Then the equilibrium points are:

$$E_1 = \left(\frac{\Lambda}{\mu}, 0, 0 \right), \\ E_2 = \left(\frac{N(\mu + \alpha_2 + \alpha_3)}{\beta_1}, \frac{-N\mu^2 - N\mu\alpha_2 - N\mu\alpha_3 + \Lambda\beta_1}{\mu\beta_1 + \alpha_2\beta_1 + \alpha_3\beta_1}, \frac{-\alpha_2(N\mu^2 + N\mu\alpha_2 + N\mu\alpha_3 - \Lambda\beta_1)}{\mu^2\beta_1 + \mu\alpha_2\beta_1 + \mu\alpha_3\beta_1} \right).$$

Theorem 3. Let E_1 be the equilibrium points of model (5). Assume that $\beta_1 \frac{\Lambda}{\mu N} < \mu + \alpha_2 + \alpha_3$. Then E_1 is locally

asymptotically stable.

Proof. The Jacobian matrix of model (5) evaluated at equilibrium point E_1 is given by

$$J(E_1) = \begin{pmatrix} -\mu & -\beta_1 \frac{\Lambda}{\mu N} & 0 \\ 0 & \beta_1 \frac{\Lambda}{\mu N} - \mu - \alpha_2 - \alpha_3 & 0 \\ 0 & \alpha_2 & -\mu \end{pmatrix}$$

According to the characteristic equation $|J(E_1) - \lambda I| = 0$.

$$(-\mu - \lambda) \left[\left(\beta_1 \frac{\Lambda}{\mu N} - \mu - \alpha_2 - \alpha_3 \right) (-\mu - \lambda) \right] = 0,$$

Eigenvalues of $J(E_1)$ are:

$$\lambda_1 = \beta_1 \frac{\Lambda}{\mu N} - \mu - \alpha_2 - \alpha_3,$$

$$\lambda_{2,3} = -\mu.$$

$$\lambda_i < 0, |\arg(\lambda_i)| = \pi > \frac{\vartheta\pi}{2}, i = 1, 2, 3.$$

According to Theorem 1, equilibrium point is E_1 locally asymptotically stable.

Theorem 4. The endemic equilibrium E_2 of the model (5) is asymptotically stable if

$$A_2 = \mu^2 + \mu\alpha_2 + \mu\alpha_3 - \frac{\Lambda\beta_1}{N} > 0.$$

Proof. The following is the jacobian matrix for model (5):

$$J(E_2) = \begin{pmatrix} \frac{-\beta_1 \left(\frac{-N\mu^2 - N\mu\alpha_2 - N\mu\alpha_3 + \Lambda\beta_1}{\mu\beta_1 + \alpha_2\beta_1 + \alpha_3\beta_1} \right)}{N} - \mu & \frac{-\beta_1 \left(\frac{N(\mu + \alpha_2 + \alpha_3)}{\beta_1} \right)}{N} & 0 \\ \frac{\beta_1 \left(\frac{-N\mu^2 - N\mu\alpha_2 - N\mu\alpha_3 + \Lambda\beta_1}{\mu\beta_1 + \alpha_2\beta_1 + \alpha_3\beta_1} \right)}{N} - \mu & \frac{\beta_1 \left(\frac{N(\mu + \alpha_2 + \alpha_3)}{\beta_1} \right)}{N} - \mu - \alpha_2 - \alpha_3 & 0 \\ 0 & \alpha_2 & -\mu \end{pmatrix}$$

According to the characteristic equation $|J(E_2) - \lambda I| = 0$,

$$(-\mu - \lambda) \left[(-\lambda) \left(\frac{-\Lambda\beta_1}{N(\mu + \alpha_2 + \alpha_3)} - \lambda \right) - \left(-\mu + \frac{\Lambda\beta_1}{N(\mu + \alpha_2 + \alpha_3)} \right) (\mu + \alpha_2 + \alpha_3) \right] = 0,$$

we get

$$P(\lambda) = (-\lambda) \left(\frac{-\Lambda\beta_1}{N(\mu + \alpha_2 + \alpha_3)} + \lambda^2 - (-\mu^2 - \mu\alpha_2 - \mu\alpha_3 + \frac{\Lambda\beta_1}{N}) \right) = 0,$$

$$\lambda^2 + \lambda \frac{(\Lambda\beta_1)}{N(\mu + \alpha_2 + \alpha_3)} + \mu^2 + \mu\alpha_2 + \mu\alpha_3 - \frac{\Lambda\beta_1}{N} = 0,$$

where

$$A_1 = \frac{\Lambda\beta_1}{N(\mu + \alpha_2 + \alpha_3)} > 0,$$

$$A_2 = \mu^2 + \mu\alpha_2 + \mu\alpha_3 - \frac{\Lambda\beta_1}{N} > 0.$$

Depending on the Routh-Hurwitz criteria, if $A_1 > 0$, $A_2 > 0$ hold, we can say that E_2 is asymptotically stable.

6. Positivity and Boundedness

Lemma 1. (Generalized Mean Value Theorem).

The assumption $w(t) \in C[a, b]$ and ${}_0^C D_t^\vartheta w(t) \in C[a, b]$ for $0 < \vartheta \leq 1$, then

$$w(t) = w(a) + \frac{1}{\Gamma(\vartheta)} {}_0^C D_t^\vartheta w(\tau)(t - a)^\vartheta,$$

where $0 \leq \tau \leq t, \forall t \in (a, b]$.

Remark 1. If $w \in C[0, b]$ and ${}_0^C D_t^\vartheta (w(t)) \geq 0, \forall t \in (0, b]$, then the function $w(t)$ is non-increasing for all $t \in [0, b]$.

Theorem 5. The solution of model (5) along with initial settings is bounded in \mathcal{R}_+^3 .

Proof: Noting that \mathcal{R}_+^3 is positivity invariant, the non negative region.

We obtain from system (5)

$$D^\vartheta S(t)_{S=0} = \Lambda \geq 0,$$

$$D^\vartheta I(t)_{I=0} = 0 \geq 0, \tag{10}$$

$$D^\vartheta R(t)_{R=0} = \alpha_2 I \geq 0.$$

According to system (10) and Remark 1, the solution of model (5) cannot escape from the hyperplanes

$S = 0, I = 0, R = 0$. if $(S(0), I(0), R(0)) \in \mathcal{R}_+^3$. This means that the region \mathcal{R}_+^3 is a collection of positive invariants.

Theorem 6.

The region $P = \{S(t), I(t), R(t) \in \mathcal{R}_+^3, 0 < S(t) + I(t) + R(t) \leq \frac{\Lambda}{\mu}\}$ is an invariant set that is positive for the system

(5).

Proof. From model (5) we have

$$D^\vartheta N(t) = \Lambda - \mu(S + I + R) - \alpha_3 I. \text{ This gives that } D^\vartheta N(t) = \Lambda - \mu N(t) - \alpha_3 I.$$

When we apply the Laplace Transform to the previous equation, we have

$$S^\vartheta w(s) - S^{\vartheta-1} N(0) \leq \frac{\Lambda}{S} - \mu w(s),$$

this further provides

$$w(s) \leq \frac{S^{-1}\Lambda}{S^\vartheta + \mu} + \frac{S^{\vartheta-1}N(0)}{(S^\vartheta + \mu)}.$$

From Definitions 3,4,we can infer if $S_0, I_0, R_0 \in \mathcal{R}_+^3$, then

$$\begin{aligned} N(t) &\leq \Lambda t^\vartheta E_{\vartheta, \vartheta+1}(-\mu t^\vartheta) + E_{\vartheta, 1}(-\mu t^\vartheta)N(0) \\ &\leq \frac{\Lambda}{\mu} \left(t^\vartheta \mu E_{\vartheta, \vartheta+1}(-\mu t^\vartheta) \right) + E_{\vartheta, 1}(-\mu t^\vartheta) \leq \frac{\Lambda}{\mu} \frac{1}{\Gamma(1)} = \frac{\Lambda}{\mu}. \end{aligned}$$

This indicates that because $N(t)$ is bounded, $S(t), I(t),$ and $R(t)$, are also bounded.

7. Numerical Scheme

We use the Caputo fractional operator to look into the dynamics of the suggested fractional order model (5). The Adams type estimator-corrector method [34–37] is employed to offer the numerical simulation of the proposed nonlinear fractional order system.

Regarding the order ϑ Caputo operator, the following Cauchy-type ODE is considered:

$${}^c_0 D_t^\vartheta \phi(t) = \phi(t, \phi(t)), \quad \phi^{(b)}(0) = \phi_0^b, \quad 0 < \vartheta < 1, \quad 0 < t \leq \tau, \tag{11}$$

where $b = 0, 1, \dots, n - 1$, and $n = [\vartheta]$. Eq. (11) can be turned to the Volterra equation:

$$\phi(t) = \sum_{b=0}^{n-1} \phi_0^{(b)} \frac{t^b}{b!} + \frac{1}{\Gamma(\vartheta)} \int_0^t (t-s)^{\vartheta-1} \phi(s, \phi(s)) ds. \tag{12}$$

By taking into account the numerical solutions of the suggested model using this proposed predictor-corrector scheme connected to the Adam-Bashforth-Moulton algorithm [35], we can take $h = \tau/N, t_z = zh$, and $z = 0, 1, \dots, N \in \mathbb{Z}^+$, by letting $\phi_z \approx \phi(t_z)$, it may be discretized using the associated corrector formula [38], which is as follows:

$$\begin{aligned} S_{q+1} &= \sum_{z=0}^{q-1} S_0^{(z)} \frac{t_{q+1}^z}{z!} + \frac{h^\vartheta}{\Gamma(\vartheta + 2)} \sum_{z=0}^q (p_{z,q+1}) \left(\Lambda - \beta_1 \frac{S_z I_z}{N} - \mu S_z \right) \\ &\quad + \frac{h^\vartheta}{\Gamma(\vartheta + 2)} \sum_{z=0}^q (p_{q+1,q+1}) \left(\Lambda - \beta_1 \frac{S_{q+1}^{PF} I_{q+1}^{PF}}{N} - \mu S_{q+1}^{PF} \right), \\ I_{q+1} &= \sum_{z=0}^{q-1} I_0^{(z)} \frac{t_{q+1}^z}{z!} + \frac{h^\vartheta}{\Gamma(\vartheta + 2)} \sum_{z=0}^q (p_{z,q+1}) \left(\beta_1 \frac{S_z I_z}{N} - \mu I_z - \alpha_2 I_z - \alpha_3 I_z \right) \\ &\quad + \frac{h^\vartheta}{\Gamma(\vartheta + 2)} \sum_{z=0}^q (p_{q+1,q+1}) \left(\beta_1 \frac{S_z I_z}{N} - \mu I_z - \alpha_2 I_z - \alpha_3 I_z \right), \\ R_{q+1} &= \sum_{z=0}^{q-1} R_0^{(z)} \frac{t_{q+1}^z}{z!} + \frac{h^\vartheta}{\Gamma(\vartheta + 2)} \sum_{z=0}^q (p_{z,q+1}) (\alpha_2 I_z - \mu R_z) \\ &\quad + \frac{h^\vartheta}{\Gamma(\vartheta + 2)} \sum_{z=0}^q (p_{q+1,q+1}) (\alpha_2 I_{q+1}^{PF} - \mu R_{q+1}^{PF}), \end{aligned}$$

where

$$S_{q+1}^{PF} = \sum_{z=0}^{q-1} S_0^{(z)} \frac{t_{q+1}^z}{z!} + \frac{h^\vartheta}{\Gamma(\vartheta + 1)} \sum_{z=0}^q (j_{z,q+1}) \left(\Lambda - \beta_1 \frac{S_z I_z}{N} - \mu S_z \right),$$

$$I_{q+1}^{PF} = \sum_{z=0}^{q-1} I_0^{(z)} \frac{t_{q+1}^z}{z!} + \frac{h^\vartheta}{\Gamma(\vartheta + 1)} \sum_{z=0}^q (j_{z,q+1}) \left(\beta_1 \frac{S_z I_z}{N} - \mu I_z - \alpha_2 I_z - \alpha_3 I_z \right),$$

$$R_{q+1}^{PF} = \sum_{z=0}^{q-1} R_0^{(z)} \frac{t_{q+1}^z}{z!} + \frac{h^\vartheta}{\Gamma(\vartheta + 1)} \sum_{z=0}^q (j_{z,q+1}) (\alpha_2 I_z - \mu R_z),$$

and

$$p_{z,q+1} = \begin{cases} q^{\vartheta+1} - (q - \vartheta)(q + 1)^\vartheta, & \text{if } z = 0, \\ (q - z + 2)^{\vartheta+1} + (q - z)^{\vartheta+1} - 2(q - z + 1)^{\vartheta+1}, & \text{if } 1 \leq z \leq q, \\ 1, & \text{if } z = q + 1, \end{cases} \tag{13}$$

where

$$j_{z,q+1} = (q + 1 - z)^\vartheta - (q - z)^\vartheta.$$

8. Numeric Simulation

The Adams-Bashforth-Moulton Predictor-Corrector approach is used within this part to display the numerical solution of our model (5) for the values in Table 1. This disease's spread and how certain factors will influence its development have been looked at. Due to this, using the values presented in Table 1, the fluctuation of each subgroup over time is shown for various values of ϑ .

In Fig.1, illustrates the susceptible people for various ϑ levels to show the most important fractional order. Thus, we can see that the susceptible people decrease over time and after the 10th day, the decrease slows down and becomes almost constant after a certain period of time.

In Fig. 2, we can see that rotavirus-infected individuals noticed the most important fractional order for various values of ϑ . As a result, we can see that people infected with rotavirus manifest as a declining course up to about day 10 and an almost constant behaviour for decreasing values of ϑ . It is obvious that people infected with rotavirus show this behavior.

In Fig. 3, shows people recovering for various ϑ values to most meaningfully see fractional order. Thus, we can observe that the recovered individuals exhibit a behavior that increases over time until the 10th day, and decreases over time for decreasing ϑ values, and then the decrease slows down. We can also see that these ϑ values intersect between the 20th and 30th days.

In Fig. 4, examines the time-dependent variation of the population in susceptible individuals for different values of $\beta_1 = 0.3637$, $\beta_1 = 0.45$, $\beta_1 = 0.55$ and $\beta_1 = 0.65$, which is the transmission coefficient of the disease in the (5) model. Here, β_1 value for the real data is taken as $\beta_1 = 0.3637$. According to this value, it is observed that the number of susceptible individuals increases over time compared to other values of β_1 in the simulation. We are trying to observe the changes in the S class compared to β_1 . The S class is shown to decline as β_1 increases, which is the case. After the 10th day, this decrease slows down and exhibits a nearly constant behavior over time.

In Fig. 5, examines the time-dependent variation of the population of rotavirus-infected individuals for different values of $\beta_1 = 0.3637$, $\beta_1 = 0.45$, $\beta_1 = 0.55$ and $\beta_1 = 0.65$ of the disease transmission coefficient β_1 . It is seen that the number of individuals infected with rotavirus for the value of $\beta_1 = 0.3637$ is less than the other values of β_1 (0.45,0.55,0.65) and the number of individuals infected with rotavirus becomes more stable over time. It is observed that the number of individuals infected with rotavirus is also significantly less for the value of $\beta_1 = 0.3637$ compared to other values and approaches zero at the end of the simulation period. When we observe the changes

in Class I compared to β_1 , we see that with the increase in β_1 , a decrease occurs first in class I . We then observe that there is an almost constant behavior.

In Fig. 6, changes have been observed in the R class compared to β_1 . With the increase in β_1 , we see that the individuals in the R class, who recovered, showed an increasing attitude until the 10th day, then decreased, then the decrease slowed down.

The numerical values of system (5) are presented in Fig.1-6 for different values of parameter β_1 and fractional order ϑ . For

$\Lambda = 2.2996e+03, \mu = 0.03360802290, \alpha_2 = 0.008841, \alpha_3 = 0.024, \beta_1 = 0.3736$, the corresponding equilibrium are:

$$E_2 = (266.7921155, 4.27079087, 1.123483586)$$

In Figures 1-3, we consider the variation in susceptible individuals, infected individuals, and recovered individuals around the equilibrium point E_2 over time for different ϑ values. These figures confirm the equilibrium point stability. So theorem 4 is valid. It was concluded that as ϑ decreased, susceptible individuals, infected individuals and recovered individuals increased. In addition, the lower the ϑ value, the lower the peak and concentration of susceptible individuals, infected individuals, and recovered individuals. From the figures we see that, when the derivative order according to 1-3 is lowered from $\vartheta = 1$, the memory effect of the system increases and therefore equilibrium point take longer to be stable. Using the same parameter values above, we consider different β_1 values such as $\beta_1=0.3637, \beta_1=0.45, \beta_1=0.55, \beta_1=0.65$ in Figures 4-6. The corresponding equilibrium points are:

$$E_2 = (266.7921155, 4.27079087, 1.123483586), \beta_1 = 0.3637,$$

$$E_2 = (221.496743, 24.3450718, 7.150003939), \beta_1 = 0.45,$$

$$E_2 = (181.2246079, 47.5483987, 12.50818989), \beta_1 = 0.55,$$

$$E_2 = (153.343899, 61.63921838, 16.21769624), \beta_1 = 0.65.$$

It is seen that as β_1 increases, susceptible and recovering individuals decrease, while infected individuals first increase and then decrease. It is easy to see that the local asymptotic stability occurs with respect to the equilibrium point E_2 . These graphs show that model (5) satisfies theorem 4. The biological existence conditions of the equilibrium points are given in Table 1.

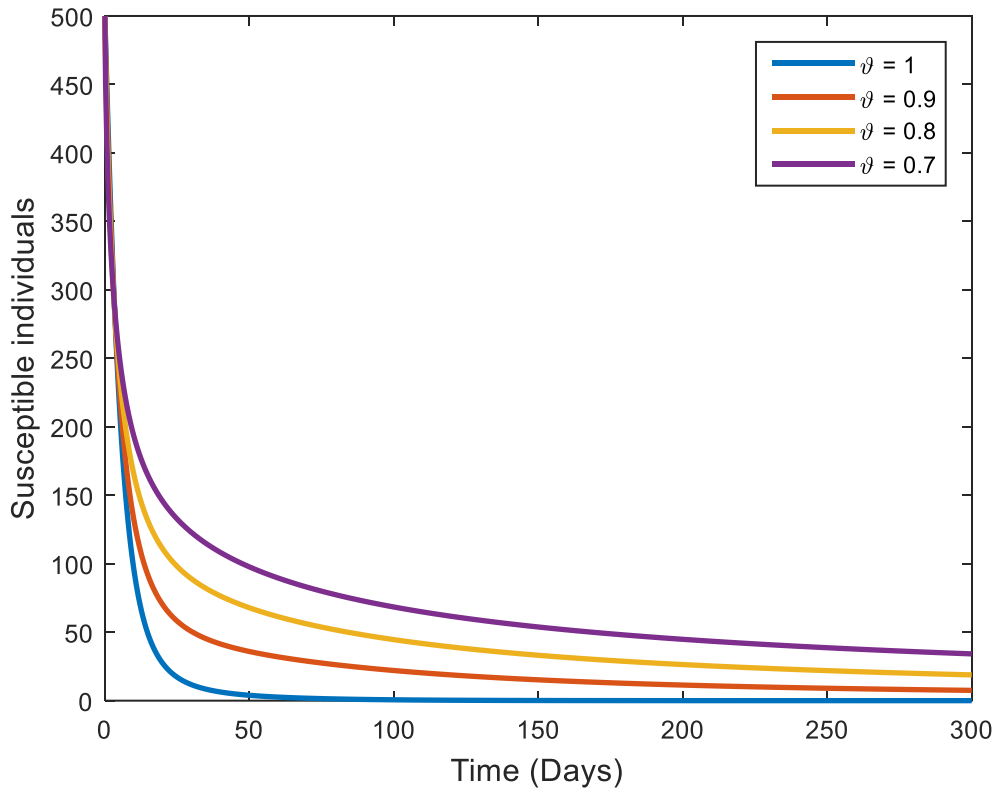


Fig.1. Change of susceptible individuals over time for various fractional order derivatives

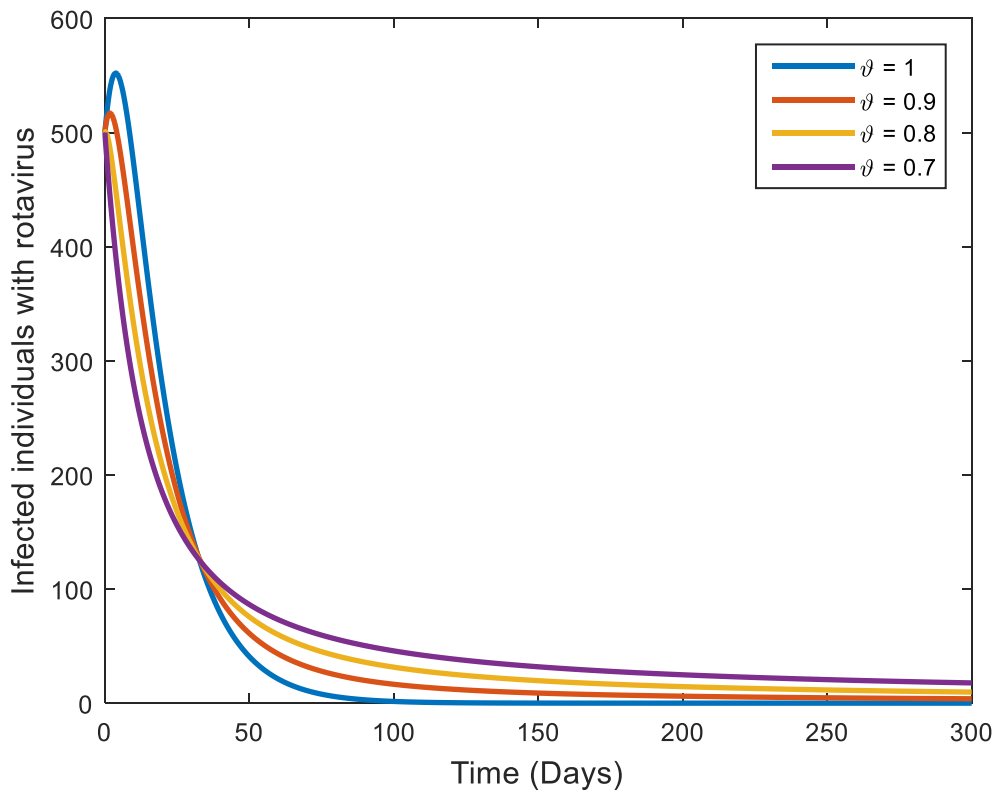


Fig.2. Change of rotavirus-infected individuals over time for various fractional order derivatives.

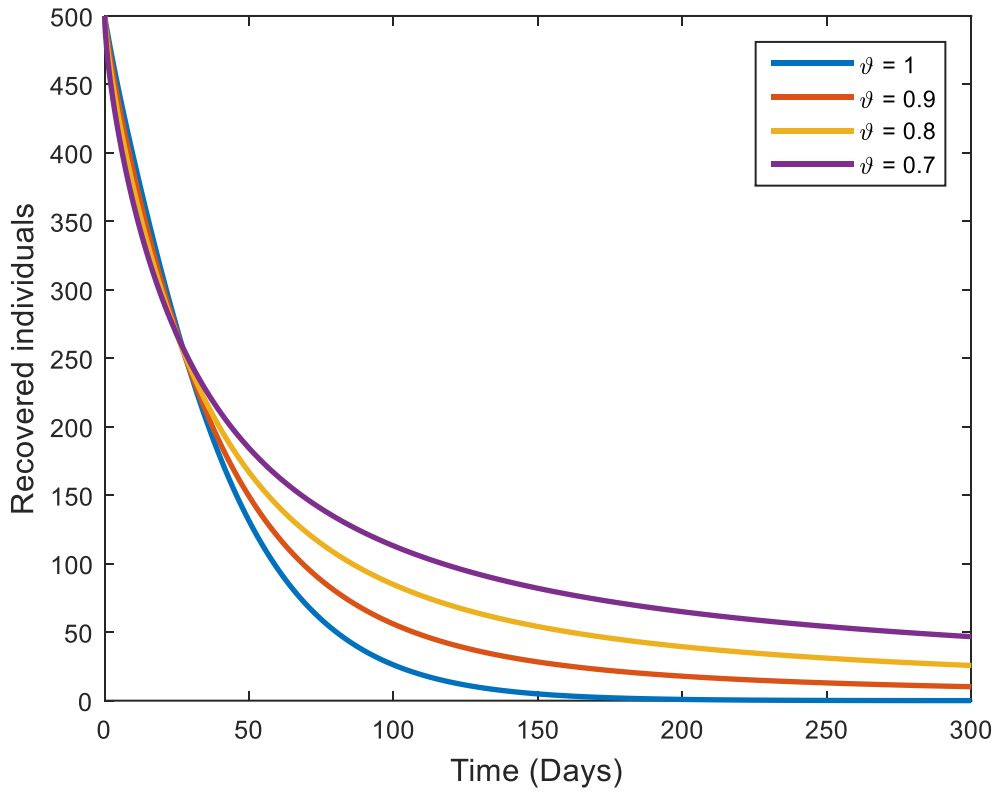


Fig.3. Change of recovered individuals over time for various fractional order derivatives

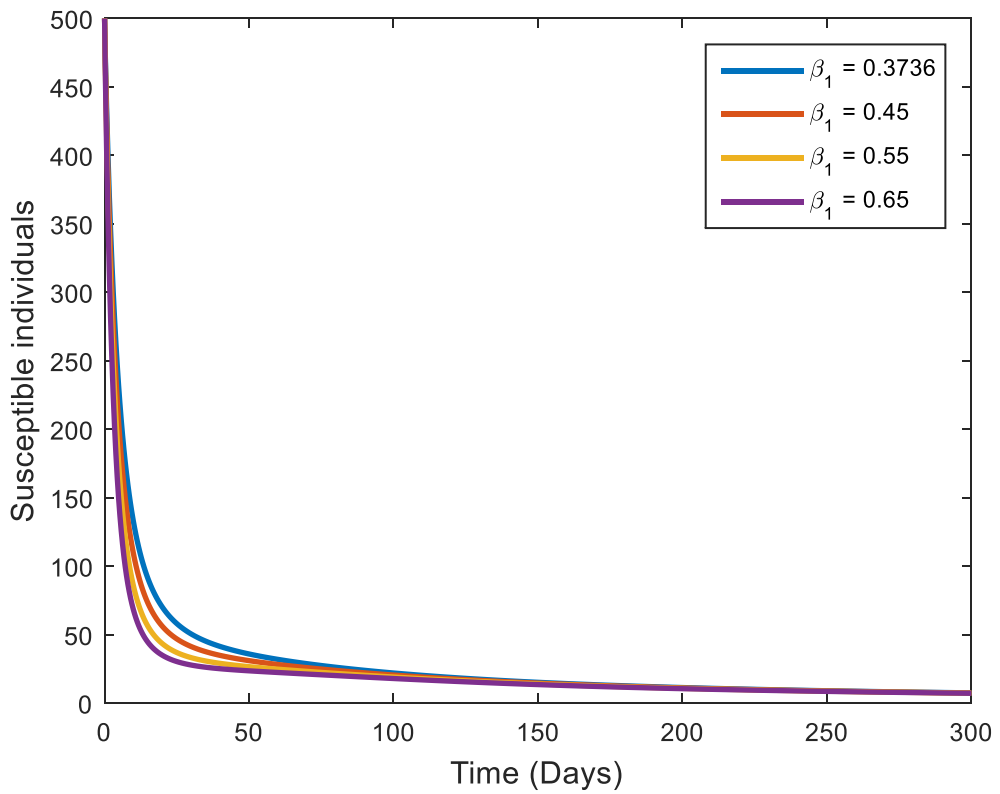


Fig.4. Change of the susceptible individuals over time for the various β_1 values and $\vartheta=0.9$

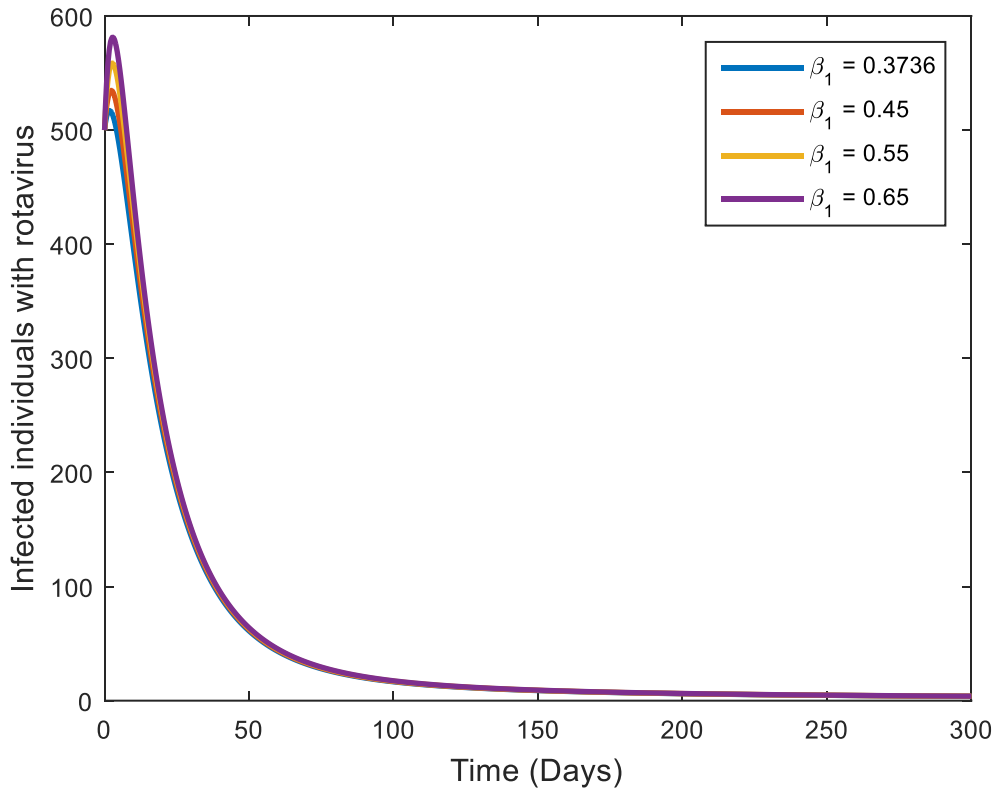


Fig.5.Change of the infected individuals with rotavirus over time for the various β_1 values and $\vartheta=0.9$

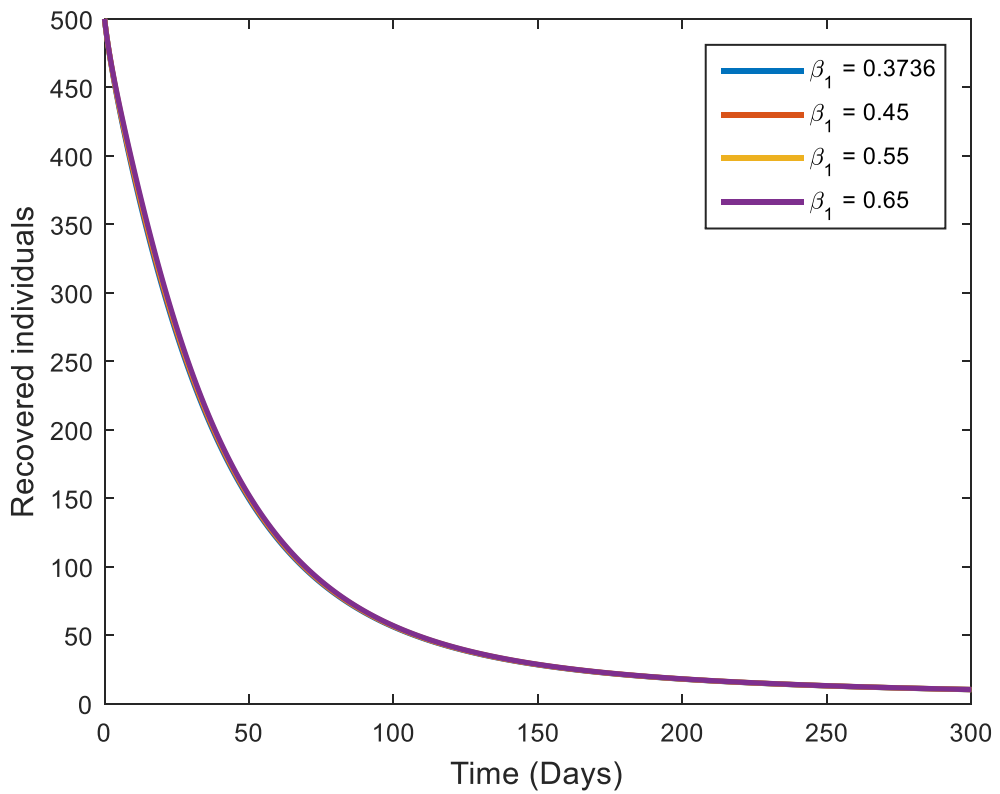


Fig.6.Change of the recovered individuals over time for the various β_1 values and $\vartheta=0.9$

9. Discussion and Conclusion

In this paper, first of all, we have given a brief information about rotavirus. Researchers have looked at how rotavirus spreads among people and what effect it has on people. Thus, a new Caputo fractional order mathematical model of disease has been created.

It has been attempted to demonstrate that the system has an equilibrium point and a solution using the fixed point theorem. The system's equilibrium points are located in order to look at the stability of these places. The Adams Bashforth-Moulton approach is used to demonstrate numerical simulations of our concept. The disease model is graphically have been expressed for different parameter values.

For these various parameter values, a difference in the number of rotavirus cases has been noted. It has been estimated that human deaths from this disease will decrease as the rotavirus cases decrease in the future. In addition, it is predicted that the spread of the disease will decrease when the disease transmission coefficient decreases. As may be inferred from the data, this demonstrates that fractional-order equations can be used to more effectively explain the impact of rotavirus.

The model is constructed using fractional-order differential equations. By examining the dynamic behavior of this model, it has been proven that the positive equilibrium point is asymptotic. The graphs for different fractional values of ϑ are examined. It has been determined that partial differential equations are more advantageous for mathematical models than full differential equations. The outcomes of the created simulations demonstrate that while the equilibrium points of fractional-order equations and integer order equations are identical, the fractional-order equation solutions take longer to reach the equilibrium point when the ϑ parameter drops.

In this way, we hope that the number of people caught and died from rotavirus will decrease significantly by making necessary predictions with the help of these mathematical models and taking necessary precautions and precautions in the future.

Acknowledgment

The authors thank the referees who contributed to the correction and development of this article.

References

- [1] Parashar, U. D., Hummelman, E. G., Bresee, J. S., Miller, M. A., & Glass, R. I. 2003. Global illness and deaths caused by rotavirus disease in children. *Emerging infectious diseases*, 9(5), 565.
- [2] Clark, H. F., Glass, R. I., & Offitt, P. A. 1999. Rotavirus vaccines. In plotkin SA, Orenstein WA (eds). *Vaccines*.
- [3] Collins, P. L., McIntosh, K., & Chanock, R. M. 1996. Respiratory syncytial virus In: Fields BN, Knipe DM, Howley PM, et al.(eds) *Fields Virology*.
- [4] Parashar, U. D., Gibson, C. J., Bresee, J. S., & Glass, R. I. 2006. Rotavirus and severe childhood diarrhea. *Emerging infectious diseases*, 12(2), 304.
- [5] Liu, L., Johnson, H. L., Cousens, S., Perin, J., Scott, S., Lawn, J. E., ... & Black, R. E. 2012. Global, regional, and national causes of child mortality: an updated systematic analysis for 2010 with time trends since 2000. *The lancet*, 379(9832), 2151-2161.
- [6] Bozdayi, G., Dogan, B., Dalgic, B., Bostanci, I., Sari, S., Battaloglu, N. O., ... & Ahmed, K. 2008. Diversity of human rotavirus G9 among children in Turkey. *Journal of medical virology*, 80(4), 733-740.
- [7] Kurugol, Z., Geylani, S., Karaca, Y., Umay, F., Erensoy, S., Vardar, F., ... & Ozkinay, C. 2003. Rotavirus gastroenteritis among children under five years of age in Izmir, Turkey. *Turkish Journal of Pediatrics*, 45(4), 290-294.
- [8] Cataloluk, O., Iturriza, M., & Gray, J. 2005. Molecular characterization of rotaviruses circulating in the population in Turkey. *Epidemiology & Infection*, 133(4), 673-678.
- [9] Ceyhan, M., Alhan, E., Salman, N., Kurugol, Z., Yildirim, I., Celik, U., ... & Pawinski, R. 2009. Multicenter prospective study on the burden of rotavirus gastroenteritis in Turkey, 2005–2006: a hospital-based study. *The Journal of infectious diseases*, 200(Supplement_1), S234-S238.
- [10] Kurugöl, Z., & Salman, N. 2008. Rotavirus infeksiyonları ve aşılar. *Ankem Dergisi*, 22(3), 160-170.
- [11] Santos, N., & Hoshino, Y. 2005. Global distribution of rotavirus serotypes/genotypes and its implication for the development and implementation of an effective rotavirus vaccine. *Reviews in medical virology*, 15(1), 29-56.
- [12] Mızrakçı, S. 2022. Rotavirus konulu yayınlara global bakış. *Black Sea Journal of Health Science*, 5(2), 239-244.
- [13] Aydın, E., Aydın, N., & Perçin Renders, D. U. Y. G. U. 2022. Evaluation of the Effect of Acute Gastroenteritis Factors on Laboratory Parameters in Pediatric Patients. *Flora Enfeksiyon Hastalıkları Ve Klinik Mikrobiyoloji Dergisi*, 27(1).
- [14] Dalir, M., & Bashour, M. 2010. Applications of fractional calculus. *Applied Mathematical Sciences*, 4(21), 1021-1032.
- [15] Loverro, A. 2004. Fractional calculus: history, definitions and applications for the engineer. *Rapport technique*, Univeristy of Notre Dame: Department of Aerospace and Mechanical Engineering, 1-28.
- [16] Podlubny, 1999. *I. Fractional differential equations*, Academic Pres, New York.
- [17] Oldham, K.B.; Spanier, 1974. *J. The fractional calculus*, Academic Pres, New York.
- [18] Miller, K.S.; Ross, B. 1993. *An introduction to the fractional calculus and fractional differential equations*, Wiley, New York.
- [19] Hilfer, 2000. *R. Applications of fractional calculus in physics*, World Scientific, Singapore.
- [20] Öztürk, I., & Özköse, F. 2020. Stability analysis of fractional order mathematical model of tumor-immune system interaction. *Chaos, Solitons & Fractals*, 133, 109614.
- [21] Naik, P. A., Zu, J., & Owolabi, K. M. 2020. Global dynamics of a fractional order model for the transmission of HIV epidemic with optimal control. *Chaos, Solitons & Fractals*, 138, 109826.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Yavuz, M., Özköse, F., Susam, M., & Kalidass, M. 2023. A new modeling of fractional-order and sensitivity analysis for hepatitis-b disease with real data. *Fractal and Fractional*, 7(2), 165.
- [25] Sabbar, Y., Yavuz, M., & Özköse, F. 2022. Infection Eradication Criterion in a General Epidemic Model with Logistic Growth, Quarantine Strategy, MediaIntrusion, and Quadratic Perturbation. *Mathematics*, 10(22), 4213.
- [26] Sene, N. 2022. Theory and applications of new fractional-order chaotic system under Caputo operator. *An International Journal of Optimization and Control*, 12(1), 20-38.
- [27] Evirgen, F., Esmehan, U. Ç. A. R., Sümeýra, U. Ç. A. R., & Özdemir, N. 2023. Modelling influenza a disease dynamics under Caputo-Fabrizio fractional derivative with distinct contact rates. *Mathematical Modelling and Numerical Simulation with Applications*, 3(1), 58-72.

- [28] Veerasha, P., Yavuz, M., & Baishya, C. 2021. A computational approach for shallow water forced Korteweg–De Vries equation on critical flow over a hole with three fractional operators. *An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications (IJOCTA)*, 11(3), 52-67.
- [29] Odionyenma, U. B., Ikenna, N., & Bolaji, B. 2023. Analysis of a model to control the co-dynamics of Chlamydia and Gonorrhoea using Caputo fractional derivative. *Mathematical Modelling and Numerical Simulation with Applications*, 3(2), 111-140.
- [30] Atede, A. O., Omame, A., & Inyama, S. C. 2023. A fractional order vaccination model for COVID-19 incorporating environmental transmission: a case study using Nigerian data. *Bulletin of Biomathematics*, 1(1), 78-110.
- [31] NWAJERĪ, U. K., ATEDE, A. O., PANLE, A. B., & EGEONU, K. U. 2023. Malaria and cholera co-dynamic model analysis furnished with fractional-order differential equations. *Mathematical Modelling and Numerical Simulation with Applications*, 3(1), 33-57.
- [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., & Yavuz, M. 2022. Investigation of interactions between COVID-19 and diabetes with hereditary traits using real data: A case study in Turkey. *Computers in biology and medicine*, 141, 105044.
- [34] 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.
- [35] Diethelm, K. 1997. An algorithm for the numerical solution of differential equations of fractional order. *Electronic transactions on numerical analysis*, 5(1), 1-6.
- [36] Garrappa, R. 2010. On linear stability of predictor–corrector algorithms for fractional differential equations. *International Journal of Computer Mathematics*, 87(10), 2281-2290.
- [37] Garrappa, R. 2018. Numerical solution of fractional differential equations: A survey and a software tutorial. *Mathematics*, 6(2), 16.
- [38] Li C, Tao C. 2009. On the fractional adams method. *Comput Math Appl*, 58(8):1573–88.
- [39] Naik, P. A., Yavuz, M., Qureshi, S., Zu, J., & Townley, S. 2020. Modeling and analysis of COVID-19 epidemics with treatment in fractional derivatives using real data from Pakistan. *The European Physical Journal Plus*, 135, 1-42.
- [40] 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.
- [41] Susam, M. 2022. Hepatit-B Hastalığının Kesirli Mertebeden Matematiksel Modeli ve Türkiye’den Gerçek Veri ile Parametre Tahmini (Master's thesis, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).

Altın Madenciliğinde, Yığın Liç Alanlarının Rehabilitasyonunda Yeraltı Suyu İle Yıkama Yaklaşımının Değerlendirilmesi

Selahattin Güney*¹, Şükrü Taner Azgın²

*¹ Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen Bilimleri Enstitüsü, KAYSERİ

² Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği, KAYSERİ

(Alınış / Received: 21.06.2023, Kabul / Accepted: 16.08.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 31.08.2023)

Anahtar Kelimeler

Altın Madenciliği,
Yığın Liç Alanı (YLA),
Cevher Atığı,
Kolon Testi,
Siyanür

Öz: Bu çalışmada, yığın liç alanlarının rehabilitasyonunda yeraltı suyu ile yıkama yaklaşımının uygunluğu, yığın liç yöntemi ile altın madenciliği faaliyetini aktif bir şekilde gerçekleştiren bir işletmenin YLA'sından işlenmiş cevher atığı alınıp, alınan numunelerin kolon testine tabi tutulması suretiyle değerlendirilmiştir. YLA'da toplam 3 bölgeden numune alınmıştır. 1 nolu numune; liç işlemleri en erken biten bölgeden, 2 nolu numune; liç işlemleri en geç biten bölgeden alınmıştır. YLA'da bulunan bütün yığının temsil edilmesi amacı ile 1 ve 2 nolu numune eşit miktarlarda karıştırılarak homojen bir numune elde edilmiş ve elde edilen numune 3 nolu numune olarak isimlendirilmiştir. 1 ve 2 nolu numuneler, 1 ve 2 nolu kolonlara, 3 nolu numune ise 3 nolu kolona ve 4 nolu kolona beslenmiştir. Her bir kolona beslenen numune miktarı 40 kg olarak ayarlanmıştır. 1, 2 ve 3 nolu kolon yıkama suyu olarak, bölgede bulunan yeraltı suyu kullanılmış, 4 nolu kolon yıkama suyu olarak ise saf su kullanılmıştır. Her bir kolon, 10 L/m².saat debi ile yıkanmıştır. Kolonların tabanlarından süzülen yıkama suyu numunelerinde, günlük olarak toplam siyanür analizleri gerçekleştirilmiştir. Kolon tabanlarında biriken yıkama suyu numunelerinde okunan Toplam CN değerleri; 1 nolu kolon için 19. Gün sonunda, 2 nolu kolon için 42. gün sonunda, 3 nolu kolon için 46. Gün sonunda <0,1 ppm değerine ulaşmıştır. 4 nolu kolon ise bölgeye düşen toplam 5 yıllık yağış miktarı baz alınarak hesaplanan yıkama suyu miktarına ulaşınca kadar saf su ile yıkama işlemine tabi tutulmuş ve 5,5 günlük yıkama işlemi sonunda elde edilen yıkama suyu numunesine ait toplam siyanür değeri 0,44 ppm olarak ölçülmüştür. Yıkamalara başladıktan sonra ilk 5 gün içerisinde, bütün kolon tabanlarından süzülen yıkama suyu numunelerinde Toplam CN değeri 1 ppm altına düşmüştür. YLA'nın bölgeye düşen yağışlar baz alınarak doğal olarak yıkanması senaryosuna göre Toplam CN değerlerindeki değişimin ortaya konulmasının amaçlandığı 4 nolu kolonun saf su ile yıkanması işlemi, toplanan numunelerdeki Toplam CN değerinin hızlı bir şekilde düştüğü tespit edilmiştir (3 günlük yıkama işlemi neticesinde Toplam CN değeri <1 ppm'e düşmüştür). Elde edilen sonuçlar irdelendiğinde, yığın liç alanlarının yeraltından çekilen sular ile yıkanarak Toplam CN değerinin <0,1 ppm altına düşürülebileceği ancak bu yaklaşımın yığın liç alanlarından depolanan işlenmiş cevher atıkları toplam miktarı dikkate alındığında, sürdürülebilir kaynakların kullanımı ve toplam yıkama süreleri açısından çok çevreci bir yaklaşım olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. 4 nolu kolon yıkama testi sonuçları dikkate alındığında, yıkama işleminin doğal meteorolojik şartlar altında uzun yıllar içerisinde kontrollü bir şekilde yapılması halinde, liç alanlarındaki Toplam CN değerinin doğal olarak istenen değerlere düşebileceği görülmüştür. Doğal yıkama işlemleri ardından, liç alanlarının yüzey geçirimsizliklerinin tekniğine uygun şekilde inşa edilmesi ve alan yüzeylerinin bölge iklimine uygun fidanlar ile ağaçlandırılarak alanın rehabilite edilmesi ve liç alanı etrafında bulunan su kalitesinin belli periyotlarda takip edilmesi ile etkin bir kapama dönemi ve kapama sonrası izleme dönemi tesis edilebilir.

Evaluation of the Groundwater Washing Approach in the Rehabilitation of Heap Leaching Areas in Gold Mining

Keywords

Gold Mining,
Heap Leaching Area (HLA),
Ore Waste,
Column Testing,
Cyanide

Abstract: In this study, the suitability of the groundwater leaching approach in the rehabilitation of heap leach areas was evaluated by taking the processed ore waste from the heap leach area of an enterprise and subjecting the samples to the column test. Samples were taken from a total of three regions in the heap leach area. Sample No. 1 was taken from the region where leaching processes were completed the earliest. Sample No. 2 was taken from the region where the leaching process was completed at the latest. In order to represent the whole heap in the HLA, samples 1 and 2 were mixed in equal amounts to obtain a homogeneous sample, and the obtained sample was named sample 3. Samples 1 and 2 were fed to columns 1 and 2, and sample 3 was fed to columns 3 and 4. The amount of sample fed to each column was set to 40 kg. Groundwater in the region was used as column washing water numbered 1, 2, and 3, and pure water was used as column washing water numbered 4. Each column was washed at a flow rate of 10 L/m².hr. Daily total cyanide analyses were performed on wash water samples filtered from the bottom of the columns. Total CN values read in wash water samples accumulated at the bottom of the column; They reached <0.1 ppm at the end of the 19th day for column 1, at the end of the 42nd day for column 2, and at the end of the 46th day for column 3. Column number 4 was washed with pure water until it reached the amount of washing water calculated based on the total amount of precipitation for 5 years in the region, and the total cyanide value of the washing water sample obtained at the end of the 5.5-day washing process was measured as 0.44 ppm. Within the first 5 days after starting the washings, the total CN value in the wash water samples filtered from all the column bases decreased below 1 ppm. According to the scenario where the HLA is naturally washed out based on the rainfall in the region, it was determined that the total CN value in the samples collected after column 4 was washed with pure water decreased rapidly (as a result of the 3-day washing process, the total CN value decreased to <1 ppm) When the results obtained were examined, it was seen that the total CN value could be reduced to <0.1 ppm by washing the heap leach areas with the water withdrawn from the ground. However, considering the total amount of processed ore waste stored in HLA, it has been concluded that this approach is not very environmentally friendly in terms of the use of sustainable resources and total washing times. Considering the results of column washing test number 4, it has been observed that the total CN value in the leaching areas can naturally decrease to the desired values if the washing process is carried out in a controlled manner over many years under natural meteorological conditions. After the natural washing processes, an effective closure period and post-closure monitoring period can be established by constructing the surface impermeability of the leaching areas in accordance with the technique, rehabilitating the area by afforesting the area surfaces with saplings suitable for the climate of the region, and monitoring the water quality around the leaching area at certain intervals.

*İlgili Yazar, email: selahattunguney58@gmail.com

1. Giriş

Altına yüksek değer verilmesinin nedenlerinden birisi, kimyasalların hemen hemen tamamının etkisine olan direncidir. İstisnalardan birisi, kıymetli metali çözüdüren siyanür veya daha doğru bir ifade ile siyanür içeren çözeltilerdir. Siyanür, madencilikte, kırma ve graviteyle ayırma gibi basit fiziksel süreçlerde kolayca zenginleştirilemeyen ve özellikle düşük tenörlü cevherlerden altını (ve gümüşü) elde etmede kullanılır. Su esaslı çözeltiler kullanılarak altın gibi metallerin çıkarılması ve kazanılması işlemine "hidrometalurji" denir. Altın madenciliği işlemlerinde, genellikle %0,01-%0,05 aralığında (milyonda 100-500 kısım) siyanür içeren çok seyreltik sodyum siyanür (NaCN) çözeltileri kullanılmaktadır. Metalin çözüdüürülmesi sürecine liç işlemi denir. Sodyum siyanür suda çözünür ve hafif oksitleyici bir ortamda cevherde bulunan altını çözer. Böylece oluşan altın içerikli çözeltiler "yükü çözeltiler" denir. Ardından yükü çözeltiler çinko metali veya aktif karbon ilave edilerek altının çözeltilerden alınması sağlanır. Geriye kalan "yüksüz" çözeltiler (altın yükü alınmış çözeltiler) yeniden altın elde etmek üzere tesise geri gönderilebileceği gibi atık arıtma tesisine de gönderilebilir [1].

Altın madenciliği, YLA, cevher atığı, kolon testi ve siyanür anahtar kelimeleri ile yapılan literatür taramasında ulaşılan birkaç çalışma aşağıda özetlenmiştir.

Akçıl tarafından 2001 [2] yılında yapılan çalışmada, Türkiye’de işletilen Ovacık Altın Madeninde gerçekleşen altın madeni üretim süreçleri ve INCO SO₂/Hava prosesi ele alınmıştır. İşletme üretim faaliyetleri neticesinde oluşan ve içerisinde siyanür bulunan solüsyonun arıtımının yapıldığı INCO SO₂/Hava prosesi çıkış suyundan (arıtıldıktan sonra atık barajına gönderilen su), Haziran 2001 - Mayıs 2002 dönemi aralığında günlük numuneler alınarak numuneler üzerinden wad siyanür analizleri yapılmıştır. Bu dönem boyunca okunan wad siyanür değerlerinin, çevresel limitlerin (0.06 ppm (en düşük) ile 1 ppm (en yüksek) arasında olduğu görülmüştür.

Karakaya vd. 2004 [3] yılında yaptıkları çalışmada, düşük sülfür ve ağır metal içeriğine sahip olan bir altın madenciliği atık çamurundan hidrojen peroksit ile oksidatif siyanür giderim etkinliğinin tespit edilmesi amacıyla nihai giderim miktarına, katalizör (Cu), hidrojen peroksit dozları, sıcaklık ve pH etkilerini araştırmıştır. Deneyle, şişe-nokta metodu ile kesikli tam karışimli reaktörlerde farklı dozlar uygulanarak yapılmıştır. Deneyle Cu katalizörü eklenmesi veya eklenmemesi gibi her iki durumda da genel olarak artan peroksit dozuyla CNWAD giderim hızının arttığı görülmüştür.

Orloff vd. 2005 [4] yılında yaptıkları çalışmada, Colorado’da yığın liç yöntemi ile altın madenciliği faaliyeti yapılan bir işletmenin merkezinden yaklaşık 800 metre uzaklıktaki ortam havasında Hidrojen Siyanür miktarını değerlendirmek amacıyla hava örneklemeleri toplamışlardır. Yapılan çalışma sonucunda toplanan ortam havası numunelerinin tespit edilebilir konsantrasyonlarda Hidrojen Siyanür gazı içermediği görülmüştür (Elde edilen örneklemeler özel bir laboratuvar ’da NIOSH Method 6010 (NIOSH, 1994) ’a göre analiz edilmiş olup analiz dedeksiyon limiti 0,2 ppb’dir).

Dam vd. 2008 [5] yılında yaptıkları çalışmada, Kuzey Avustralya’da yer alan ve 1994 yılından 2000 yılına kadar işletilip araştırma tarihi itibariyle hizmet dışı bırakılan bir altın madeninden çıkan sızıntı sularının Edith Nehri havzasındaki toksisitesini değerlendirmişlerdir. Havuzlardan alınan örneklerin Bakır, Çinko ve Alüminyum parametreleri açısından toksik etki oluşturduğu belirlenmiştir. Madenden kaynaklanan sızıntı sularının havzadaki su ortamında toksik etki oluşturmaması için 1/20000 oranında seyreltilmesi gerektiği ayrıca ortaya konulmuştur.

Sayiner vd. 2012 [6] yılında yaptıkları çalışmada, altının siyanür ile liç edilmesi sırasında cevherlerde bulunan Ag, Ni, Cu gibi diğer metallerin de siyanürle reaksiyona girip altın ile birlikte çözeltiye geçtiğini, bu çözünmüş haldeki metallerin az ya da çok karbona adsorbe olduklarından, altının çözüldükten sonra karbon adsorpsiyonu ile kazanımında engel oluşturabildiklerini belirtmişler ve deneysel çalışmalarında sentetik olarak elde ettikleri çözeltilerdeki Ag, Ni ve Cu’nun altın adsorpsiyonuna etkilerini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar şu şekildedir. 5 ppm Au içeren çözeltinin 48 saatlik adsorpsiyon verimi %99,04, 10 ppm’in %98,13; ve 15 ppm Au içeren çözeltinin %97,16 olarak gerçekleşmiştir. Au adsorpsiyonuna en yüksek etkiyi, Au adsorpsiyonunu %98,13’ten %83,77’ye düşüren 200 ppm Ag gerçekleştirmektedir. 250 ppm Ni ilavesi ise Au adsorpsiyon verimini %90,65’e; 300 ppm Cu ise %94,59’a düşürmüştür.

Kekeç vd. 2014 [7] yılında yaptıkları çalışmada, Türkiye’de bulunan bir altın madenciliği işletmeciliğinde olası çevresel etki değerlendirilmelerinin tespit edilerek alınacak önlemler ve yapılacak çalışmaların ortaya konması amaçlanmıştır. Söz konusu çalışmada altın madeni işletmeciliği çevresel etkileri açısından değerlendirilerek, hava, su, toprak kalitesi inceleme çalışmaları yapılmıştır. Altın madeni sahası içerisinde örnekleme alanları belirlenmiş, alınan numunelerin analizleri yapılarak etkileşim süreçleri izlenmiştir. İzleme çalışmaları, açık ocak madencilik faaliyetleri kapsamında yapılan patlatma faaliyetleri esnasında sismograf cihazları ile alınan hava şoku ve titreşim ölçümleri, işletme ÇED sınırları etrafından 7/24 alınan gürültü ölçümleri, çöken toz ölçüm sonuçları, PM-10 ölçümleri, HCN ölçümleri ve bölgedeki yeraltı ve yüzey sularından numuneler alınarak saha parametrelerinin ölçülmesi ana başlıkları altında yürütülmüştür. Elde edilen veriler yasal sınırlar kapsamında değerlendirilmiş ve tartışılmıştır. Sonuç olarak altın madenciliğinde, gerek işletme öncesi alınan tedbirler gerekse işletme dönemi ve kapama döneminde alınan tedbirler kapsamında çevre ile uyumlu ve sürdürülebilir madencilik faaliyeti yürütülebileceği analiz sonuçları ile ortaya konulmuştur.

Erkan vd. 2015 [8] yılında, farklı kırma boylarının yığın liçi prosesinde altın verimine ve yığın geçirimsizliğine etkilerinin incelenmesi amacıyla jeometalurjik çalışmalar, laboratuvar ölçekli testler (ince ve iri boy şişe çevirme testleri ve kolon testleri) ve geçirimsizlik testleri yapmışlardır. Testlerde kullanılacak cevher temini planlanan açık ocağın üç boyutlu modeli hazırlanarak ince taneli cevherin oluşturduğu üst bölümden D1 koduyla orta bölümde yer alan hem ince hem kayaçlı tane içeren bölümden D2 koduyla ve ocağın tabanında bulunan ve kayaçlı yapıya sahip olan bölümden D3 koduyla kompozit örneklemeler olacak şekilde alınmıştır. Örneklemeler üzerinde, yığın liçi verimini laboratuvar ortamında test edebilmek için 3 farklı kompozit ve 3 farklı tane boyu dağılımında toplam 9 adet kolon testi yapılmıştır. 54 gün boyunca liç işlemine tabi tutulan kompozitlerde çözeltiye geçen altın

miktarının önemli ölçüde artmaması sonucunda kolon testi bitirilmiştir. Altın kazanımlarının 54 gün sonunda D1-A, D1-B ve D1-C örnekleri için sırası ile %86.06, %89.51 ve %87.72 olarak gerçekleştiği görülmüştür. Ayrıca, YLA'nın optimum yüksekliğinin tespit edilebilmesi amacıyla örnekler üzerinde geçirimsizlik testleri (yük altında ki malzemenin farklı yüksekliklerine basınç sensörü konularak malzeme geçirgenliğinin ortaya konması) yapılmıştır. Test sonuçlarına göre, D1 A örneğinde 24 metreden sonra kısmi göllenmeler görülmüş ve 30 metrelik basınç altında ciddi oranda geçirimsizliğini kaybetmiştir. D1 B örneğinde 24 metreden sonra kısmi göllenmeler görülmüş ve 36 metrelik basınç altında ciddi oranda geçirimsizliğini kaybetmiştir. D1 C örneğinde 54m yüksekliğe kadar su akışında bir sıkıntı gözlenmemiştir. Testler benzer yaklaşımla D2 – A, B, C ve D3 – A, B, C örneklerinde 54 metrelik yüksekliğe karşı gelen basınç değerine kadar geçirimsizlikte herhangi bir sıkıntı gözlenmemiştir.

Koç vd. 2016 [9] yılında yaptıkları çalışmada, Mevcut endüstriyel siyanür geri kazanımı proseslerinin olumsuz yönlerini dikkate alarak, endüstriyel uygulama potansiyeli olan etkin, yeni ve alternatif bir yöntemin geliştirilmesini amaçlamışlardır. Önerilen yöntem, toksik etkisi düşük organik bir reaktif olan trimercapto-s-triazine (TMT) kullanılarak, siyanür kompleksleri halinde bulunan metallerin, metal-TMT bileşiği şeklinde altından seçimli olarak çöktürülmesi ve kompleks halindeki siyanürün serbestleştirilmesi (geri kazanımı) esasına dayanmaktadır. Yapılan çalışmalarda sentetik ve gerçek yüklü liç çözeltilerinden TMT ile çinko ve gümüşün kısa sürede (5-15 dk.) yüksek verimlerle (>%91) kazanıldığı, ancak bakırın çökme kinetiğinin çok yavaş olduğu (4 günde %55 Cu) belirlenmiştir. TMT dozunun artırılması metallerin çöktürme verimini arttırmasına karşın yüksek siyanür konsantrasyonlarının çinko ve bakırın çöktürme performansını olumsuz etkilediği görülmüştür. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, önerilen çöktürme yöntemi ile yüklü liç çözeltilerinden özellikle gümüş ve çinkonun altından seçimli olarak kazanılabileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca bu çalışmada, AVR ve SART gibi mevcut prosesler ile önerilen prosesin karşılaştırılması yapılmış, önerilen prosesin mevcut proseslere göre potansiyel avantaj ve dezavantajları belirtilmiştir.

Donato vd. 2017 [10] yılında yaptıkları çalışmada, madencilik endüstrisindeki altın ve gümüş geri kazanım süreçlerinde kullanılan siyanürün yaban hayatı için risk teşkil ettiğini bu risklerin bertaraf edilmesi için alınması gereken önlemlere dikkat çekmişlerdir. Ayrıca altın – gümüş madenciliği faaliyetlerinde kullanılan siyanürün, güvenli yönetimini belgeleyen ve uluslararası bir sertifika programı olan siyanür yönetim kodunun önemi vurgulanmıştır (Siyanür Yönetim Kodu, siyanür kullanılarak altın ve gümüş üretimi ile uğraşan ve bu siyanürü üreten, taşıyan ve depolayan şirketlerin siyanürün güvenli ve çevreye duyarlı yönetimine odaklanan, gönüllülük ilkesine dayalı bir sertifika programıdır. Birleşmiş Milletler Çevre Programı himayesinde çok paydaşlı bir yönlendirme komitesi tarafından geliştirilmiş olan ve madencilik sektöründeki en köklü sertifika programları arasında yer alan Siyanür Yönetim Kodu, işletmeyi bulunduğu bölgenin yürürlükteki yasa ve yönetmeliklerine uyma konusundaki mevcut yükümlülüğünü tamamlayıcı niteliktedir).

Şendur vd. 2020 [11] yılında yaptıkları çalışmada, düşük tenörlü altın cevheri için, farklı testlerdeki liç davranışlarını incelenmişler ve uygulanacak altın kazanım prosesi için uygun yöntemler önermişlerdir. Örnekler, Kütahya'nın Tavşanlı ilçesinin Balıköy mevkiinden alınmıştır. Bölgeye ait olan düşük tenörlü altın rezervinin liç testlerindeki davranışlarını incelemek için, 2 farklı laboratuvar testi uygulanarak bunların karşılaştırılması yapılmıştır. Bu testler kolon ve tank liç testleri olup, farklı tane boyutları için incelemeler yapılmıştır. -20 mm ve -12,5 mm kırma tane boyutu için kolon testleri uygulanmış olup, -0,075 mm için tank liç testleri uygulanmıştır. Uygulanan liç testlerinde NaCN kullanılmış olup, pH düzenleyici olarak Ca(OH)₂ (sönmüş sanayi kireci) tercih edilmiştir. Farklı tane boyutlarında gerçekleştirilen testlerin sonucunda her iki kimyasal için, tüketim değerleri hesaplanmış olup, karşılaştırmaları yapılmıştır. Bu araştırma sonucunda düşük tenörlü altın cevheri için elde edilen altın kazanım oranları hesaplanmış olup, maksimum altın verimi -0,075 mm tane boyutunda gerçekleşmiştir. Altın kazanım verimleri, kolon liç testlerinde %77, tank liç testlerinde %82 olarak elde edilmiştir. Tank liç testi 72 saat sürerken, kolon liç testi 10 hafta gibi uzun bir sürede tamamlanmıştır.

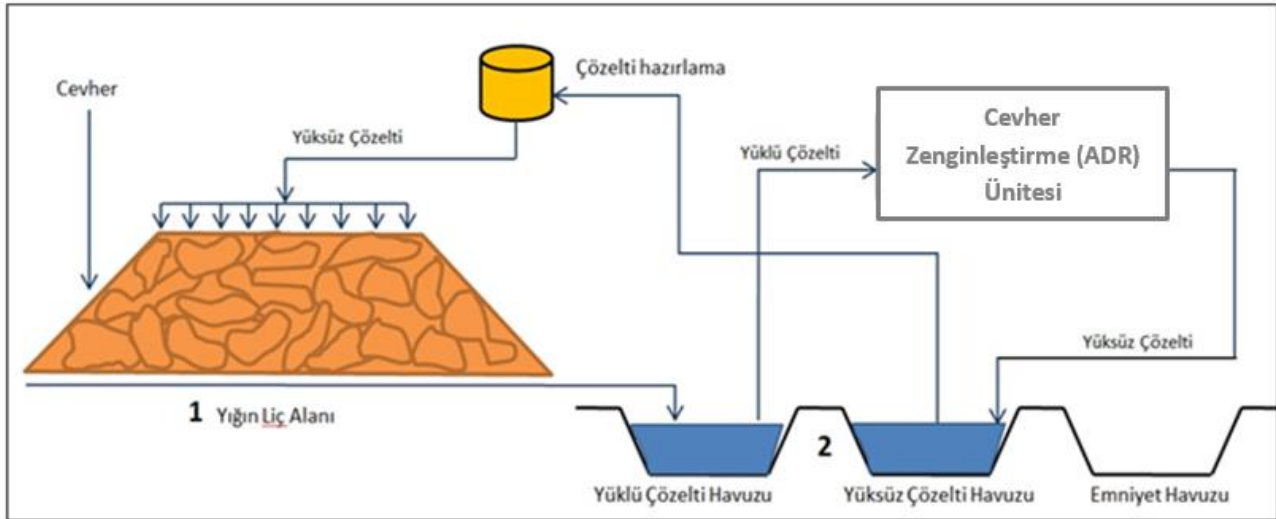
Koçan tarafından 2021 [12] yılında yapılan çalışmada, cevherden altın üretiminde son yıllarda yaygın olarak kullanılan siyanür liç prosesi ve bu proses atıklarının çevresel etkileri ile siyanür atıklarının arıtılmasında uygulanan INCO SO₂/Hava prosesini incelenmiştir. Günümüzde siyanür atıklarının arıtılması için tercih edilen en yaygın yöntemin kimyasal INCO SO₂/Hava prosesi olduğu, bu proses kullanılarak, atıklardaki toplam siyanür derişiminin 1 ppm'in altına düşürülebildiği ve toksik siyanürlerin amonyum ve karbonat gibi zararsız formlara dönüştürülebildiği vurgulanmıştır.

Altın madenciliği ve siyanür anahtar kelimeleri ile yapılan literatür taraması neticesinde ulaşılan çalışmaların, altın madeni işletmelerinde ve etrafındaki doğal yaşam üzerinde siyanürün çevresel risklerine yönelik olduğu, anahtar kelimelere kolon testi ve yığın liçi ibaresinin de eklenmesi ile birlikte yapılan aramalarda ulaşılan çalışmaların ise işletme döneminde kullanılacak olan cevher örneği üzerinde kolon testlerinin yapılması ve elde edilen sonuçlara göre yığın liç alanlarının tasarım parametrelerinin belirlenmesine yönelik olduğu görülmektedir. Literatüre

benzer bir çalışma kazandırılmamış olması bu araştırmayı diğer araştırmalardan ayırtıran en temel özellik olarak göze çarpmakta olup araştırmanın özgünlüğünü ortaya koymaktadır.

Dünyada, NaCN kimyasalı kullanılmak suretiyle dore altın-gümüş metalinin elde edilmesi iki ana üretim yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemler, tank liçi yöntemi ve yığın liçi yöntemidir. Bu çalışmaya konu olan yığın liçi yöntemi, genellikle cevher içerisinde altının düşük tenörlerde olması halinde tercih edilmektedir (ton başına 2 g'dan daha az altın içeren düşük tenörlü altın cevherlerine yığınla siyanür liçi uygulanabilir) [12].

Yığın liçi yöntemi ile altın madenciliğinde uygulanan genel iş akışı şu şekildedir. Açık ocak ya da yeraltı madenciliği ile çıkarılan cevher, kırma ve eleme ünitelerinden geçirilip istenen tane boyutuna getirildikten sonra, taban geçirimsizliği doğal (kil) ve yapay geçirimsizlik malzemeleri (jeomembran) ile sağlanmış yığın liç alanlarına, belirli bir şev yüksekliği ve şev açısı ile serilir. Serilen cevher üzerine, içerisinde belirli oranlarda NaCN kimyasalı bulunan solüsyon, damlama sulama prensibi ile verilerek cevher ile solüsyonun teması sağlanır. Bu temas esnasında gerçekleşen kimyasal tepkimeler neticesinde cevher içerisindeki altın, sıvı forma geçerek NaCN kimyasalı ile kimyasal bir bağ oluşturur ve cevherden ayrılmış olur. Cevher içerisinde aşağı yönlü ilerleyen solüsyon, YLA tabanında bulunan geçirimsiz jeomembrana ulaştığında, taban da teşkil edilmiş delikli borulara girerek yine taban geçirimsizlikleri sağlanmış olan yüklü solüsyon havuzuna ulaşır. Yüklü solüsyon havuzunda depolanan ve içerisinde altın bulunan solüsyon, ADR (adsorpsiyon - desorpsiyon - regenerasyon) ünitesine gönderilerek bu ünite de gerçekleşen metalürjik işlemler neticesinde dore altın olarak üniteden çıkar. Altını alınmış olan solüsyon ise yüksüz solüsyon havuzlarına iletilir ve burada NaCN ayarlaması yapılarak yeniden YLA'da bulunan cevher yüzeyine gönderilir. Bu şekilde YLA, havuzlar ve ADR ünitesi arasında geri devirli, sürekli solüsyon döngüsü tesis edilir. Bu döngü, 90-120 gün arasında sürer ve belirtilen süre sonunda cevher içerisindeki altının geri kazanımı mümkün olan kısmı cevherden alınmış olur. Bu işlem YLA'nın tasarım kapasitesi doluncaya kadar devam eder. YLA'nın kapasitesi dolup son liç döngüsü tamamlandıktan sonra geriye altını alınmış maden atığı kalır ve YLA'nın rehabilitasyonu sürecine geçilir. Yığın liçi yöntemiyle altın eldesi iş akım şeması Şekil-1'de verilmiştir.



Şekil 1. Yığın Liç Yöntemiyle Altın Eldesi İş Akım Şeması

Ülkemizde, yığın liç alanlarında işlenen cevher, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığınca çıkarılan Maden Atıkları Yönetmeliği gereğince maden atığı olarak değerlendirilmektedir. Bu alanların rehabilitasyonu, yöntem ve tekniğine uygun olarak hazırlanan, Maden Kapama Planlarının Çevre ve Şehircilik Bakanlığınca onaylanması akabinde plana bağlı kalınarak gerçekleştirilmektedir. Gerek kapama planlarında gerekse ÇED Raporu hazırlık süreçlerinde en çok üzerinde durulan konu, yığın liç alanlarında kalan maden atığı içindeki bakiye siyanür miktarının nasıl bertaraf edileceği ya da istenen değerlere nasıl düşürüleceği sorusudur. Bu sorunun cevabı olarak ÇED Raporu hazırlık süreçlerinde öngörülen genel yaklaşım ise, yığın liç alanlarının kapatılması öncesinde, alanda kalan bakiye maden atığının yeraltı suyu kullanılarak yıkama suretiyle liç alanı tabanından toplanan yıkama suyundaki Toplam CN değerinin 0,1 ppm altına düşürülmesidir [2].

Yukarıda verilen bilgiler ışığında bu çalışmada, YLA'dan alınacak olan maden atıklarının birbirleri ile aynı özelliklere sahip olan eşdeğer kolonlara yüklenerek yeraltı suyu ve saf su ile, kolon tabanında toplanan yıkama suyu numunelerindeki Toplam CN değerlerinin <0,1 ppm altına düşene kadar yıkama suyunun sağlanması ve optimum yıkama yönteminin laboratuvar ölçekli olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Böylelikle gerçek ölçekli yığın

liç alanlarının kapatılması için benimsenen maden atığı yıkama yaklaşımının ne denli doğru ve uygulanabilir bir yaklaşım olduğu hakkında ortaya bilgi konulması hedeflenmektedir. ,

2. Materyal ve Metot

Maden atıklarının kolon testleri tipik olarak kesikli ve sürekli olmak üzere iki temel kategori de gerçekleştirilir. Sızdırma testleri için seçilen reaktörler, kapalı bir kap, bir hücre veya bir kolon şeklinde olabilmektedir. Çalışmaya konu olan kolon testleri, 1,2 ve 3 nolu kolon testleri için sürekli, 4 nolu kolon testi için ise kesikli kategoride gerçekleştirilmiştir.

Sürekli kolon liç testleri tipik olarak borunun katı bir numuneyle doldurulması ve numuneden sürekli olarak belirli bir debide su veya başka bir sızıntı sıvısı geçirilmesiyle gerçekleştirilir. Sızıntı suyu numuneleri istenilen herhangi bir sıklıkta toplanabilir ve ilgili herhangi bir bileşen için analiz edilebilir. Kolon liç testi tasarımında aşağıdakiler dâhil birçok değişken vardır:

- Sütun uzunluğu ve çapı
- Akış tipi (alttan cebri akış veya üstten yerçekimi akışı)
- Akış hızı/ikamet süresi
- Numune ön işlemi (partikül boyutu küçültme, oksidasyon, bakteri aşılama)
- Sızdıran bileşimi (su veya diğer reaktif, O₂'yi çıkarmak için serpilmiş, vb.)

Çalışma yürütülen kolon testleri, aşağıda belirtilen şekilde tasarlanmıştır.

- Kolon yüksekliği 2 metre ve kolon çapı 15 cm olarak seçilmiştir.
- Akış tipi: üstten yerçekimi akışı ile kolon içerisindeki maden atığına yeraltı suyu verilmesi ve 1 günlük taban akışı sonunda biriken homojen numunenin kolon altına konulan beherde toplanması şeklinde planlanmıştır.
- Akış hızı, ikamet süresi: 10 litre/(m².saat) olarak uygulanmıştır.
- Numune ön işlemi: YLA'da toplam 2 bölgeden numune alınmış olup numunelere ön işlem uygulanmamıştır.

Kolon testlerinde kullanılan numune, Türkiye'de açık ocak ve dore altın-gümüş üretimi faaliyeti gerçekleştiren bir altın madeni işletmesi YLA'sından temin edilmiştir.

Günlük olarak, kolon yüzeylerine beslenen besleme suyu miktarları ve kolon tabanlarında ki beherlerde toplanan yıkama suyu miktarları kayıt altına alınmıştır. Toplanan yıkama sularından numuneler alınarak, Hach Lange HQ40 D marka multimetre ile numunelerin pH 'larına bakılmıştır. Koruma önlemi olarak, numunelerin pH'ları, NaOH kimyasalı ile pH 10,5 üzerine çıkarılmıştır. Kolon testleri boyunca oluşan yıkama sularından alınan numunelerde Toplam CN analizleri, Standart Methods 4500 CN⁻, Kolorometrik Metod ile Toplam Siyanür Tayin Yöntemine göre gerçekleştirilmiştir. Günlük rutin pH ve Toplam CN analizleri dışında testlerin başlatıldığı ilk gün ve takip eden 15'er günlük periyotlarda yıkama suyu olarak kullanılan ham su ve saf sudan da numuneler alınarak Toplam CN değerlerine bakılmıştır. Gerçekleştirilen bütün çalışmalarda, iş güvenliği konularına yüksek derecede hassasiyet gösterilmiştir (kke kullanımı, gaz ölçüm dedektörleri ile yapılan ortam ölçümleri vs).

Bu çalışmada uygulanan deneysel çalışma, 2 ana başlık halinde toparlanmıştır. Bu başlıklar şu şekildedir.

1. Numunelerin Alınması ve Kolonlara Yüklenmesi
2. Kolon Testlerinin Gerçekleştirilmesi

2.1. Numunelerin Alınması ve Kolonlara Yüklenmesi

YLA'da iki bölgeden numune alınması kararlaştırılmıştır. Numune alma noktalarından birincisi, siyanür liç işlemleri en erken biten ve meteorolojik şartlar nedeniyle en az Toplam CN değeri beklenen bölge olarak seçilmiştir. Numune alma noktalarından ikincisi ise, siyanür liç işlemleri en geç biten bölge olan ve en yüksek Toplam CN değeri beklenen bölge olarak seçilmiştir. 1 nolu numune; liç işlemleri en erken biten bölgeden, 2 nolu numune; liç işlemi en geç biten bölgeden alınmıştır. YLA'da bulunan bütün yığının temsil edilmesi amacı ile 1 ve 2 nolu numune eşit miktarlarda karıştırılarak homojen bir numune elde edilmiş ve elde edilen numune 3 nolu numune olarak isimlendirilmiştir. 1 ve 2 nolu numuneler, 1 ve 2 nolu kolonlara, 3 nolu numune ise 3 nolu kolona ve 4 nolu kolona beslenmiştir. Her bir kolona beslenen numune miktarı 40 kg'dır. Numune alma işlemleri 16.03.2022 tarihinde gerçekleştirilmiş ve numunelerin hazırlanarak kolonlara beslenmesi, 17.03.2022 tarihinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Numunelerin Alınması ve Kolonların Hazırlanması

2.1. Kolon Testlerinin Gerçekleştirilmesi

1, 2 ve 3 nolu numunelere ait kolon testleri, kolon yüzeylerine sürekli olarak 2,95 mL/dk hamsu (yeraltı suyu) yıkama debisi verilmesi suretiyle gerçekleştirilmiştir. Yıkama neticesinde elde edilen günlük kompozit numunelerin miktarları kayıt altına alındıktan sonra her gün saat 12.30'da numune alınmıştır. Testler, alınan numunelerdeki Toplam CN değerleri 0,1 ppm altına düştüğü ana kadar devam ettirilmiştir.

Kolon yüzeyine verilecek olan yıkama suları için hacimleri bilinen beherlere besleme suları eklenmiştir. Ayrıca yıkama neticesinde kolon tabanından süzülecek olan suların toplanması için yine hacimleri bilinen beherler hazırlanmıştır. Yıkama suları olarak, 1,2 ve 3 numaralı kolonları besleyecek olan beherlere yeraltı suyu (hamsu), 4 nolu kolonu besleyecek olan beherlere ise saf su eklenmiştir (her bir kap içerisine 7000 mL olacak şekilde). Kolonlara verilecek yıkama suyu debileri, peristaltik pompa aracılığıyla 10 litre/(m².saat) = 2,95 mL/(0,01766 m².dk) olacak şekilde ayarlanarak 17.03.2022 tarihinde saat 12.30'da bütün kolonlarda yıkama işlemi başlatılmıştır (0,01766 m² testlerde kullanılan 15 cm çaplı kolonların atmosfere açıldıkları yüzey alanlarıdır).

1,2 ve 3 nolu kolonlara beslenecek olan yıkama suları, işletmenin bulunduğu bölgede yeraltından çıkarılan yeraltı sularından temin edilmiştir. Kolonlara beslenecek olan yıkama suları, içerisinde 7000 mL yıkama suyu bulunan beher içerisine peristaltik pompa giriş suyu hortumunun daldırılması suretiyle alınmış ve yine peristaltik pompa çıkış suyu hortumunun kolon içerisine boşaltılması suretiyle kolon içindeki cevher ile teması sağlanmıştır. Kolon yıkama işlemi neticesinde kolon içerisinden tabana doğru süzülen suların toplanması ve kayıt altına alınması maksadı ile toplama suyu hortumu çıkışına toplama suyu beheri konulmuştur. Yıkama işlemi üzerinden 24 saat geçtikten sonra, kolon tabanlarında bulunan küresel vana kapatılarak kolon besleme suyu miktarı mezür içerisine alınan yıkama suyu ile yeniden 7000 mL'ye tamamlanarak günlük yıkama suyu sarfiyat miktarı kayıt altına alınmıştır. Ardından kolon tabanında ki toplama suyu beheri içerisinde biriken su miktarı, beher üzerinden okunarak kayıt altına alınmıştır. Kayıt işlemi akabinde toplanan yıkama suyundan 250 mL numune alınarak numunenin pH'ı ölçülmüş ve pH 10,5 ve üzeri olacak şekilde NaOH ile pH ayarlaması yapılmıştır. Alınan numunenin, numune alınış tarihi üzerinden bir gün geçmeyecek şekilde Toplam CN analizleri gerçekleştirilerek spektroskopi de okunan değerler kayıt altına alınmıştır. Toplama suyu beherinden numune alımı ardından geriye kalan su dökülerek beher öncelikle bol çeşme suyuyla yıkanmış ardından da bol saf sudan geçirilerek kolon tabanında kendisi için ayrılan yere konulmuş ve ikinci gün yıkamaları başlatılmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Kolon Testlerinin Gerçekleştirilmesi

Ayrıca, yığın liç alanlarında bulunan CN liç işlemi tamamlanmış olan cevher atıklarının doğal yıkama ile (bölgeye düşen yağışlar) içermiş oldukları Toplam CN değerlerindeki düşüş eğiliminin ortaya konulması maksadıyla 4 nolu kolon testi planlanmıştır. Bu plan doğrultusunda 4 nolu kolon yüzeyine de sürekli olarak 2,95 mL/dk. yıkama

debisiyle yağış sularını temsilen saf su verilmiştir. 4 nolu kolon yüzeyine verilecek olan toplam saf su miktarının belirlenmesi, işletmenin bulunduğu bölgede yer alan otomatik meteoroloji gözlem istasyonundan elde edilen son 5 yıllık yağış verileri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Son 5 yıl içerisinde yıl bazında gerçekleşen toplam yağış miktarları ortaya konularak her yıl için kolon yüzey alanına düşecek olan yağış suyu miktarı hesaplanmıştır. Hesaplanan yıllık miktarlar kadar yıkama suyu 5 nolu kolon yüzeyine verildikten sonra, yıkama durdurulmuş ve kolon içerisindeki yıkama suyunun bir gün boyunca kolon tabanındaki beherde birikmesi sağlanmıştır. Kolon tabanındaki beherden Toplam CN analizi için numune alındıktan sonra sonraki yıl için hesaplanan yıkama debisi üzerinden saf su yıkaması başlatılmıştır. Böylelikle 4 nolu kolonun saf su ile yıkaması işlemi 10. Gün sonunda sonlandırılmıştır. Özetle 4 nolu kolonda gerçekleştirilen saf su ile yıkama senaryosu aşağıdaki kabul ve hesaplamalara göre gerçekleştirilmiştir.

Son 5 yılın gerçekleşen yıllık toplam yağış miktarları, bölgede bulunan Otomatik Meteoroloji Gözlem İstasyonundan alınmıştır. Yıllık toplam yağış miktarları ve bu miktarlar için 15 cm çapa sahip olan kolona ne kadarlık bir yıkama debisi düşeceği, bu debi miktarına 2,95 mL/dk. yıkama debisiyle kaç saatlik bir yıkama sonrasında ulaşılacağına dair bilgiler Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. 4 Nolu Kolon Yıkama Suyu Hesap Tablosu

Yıllar	Gerçekleşen Toplam Yağış Miktarları (mm/m ²)	15 cm Çaplı Kolon Yüzeyine Düşecek Yağış Suyu Miktarı (Litre/yıl)	Yıkama Debisi (litre/m ² .s aat)	Yıkama Süresi (saat)	Toplam Yıkama Süresi (Dk)	Toplam Yıkama Süresi (Saat, Dk.)
2017	210,7	3,72	10	21,07	1264,2	21 saat 4 dk
2018	285,8	5,04		28,58	1714,8	28 Saat 35 dk
2019	301,3	5,32		30,13	1807,8	30 saat 8 dk
2020	277	4,89		27,7	1662	27 saat 42 dk
2021	248,5	4,38		24,85	1491	24 saat 51 dk

Tablo 1’de sunulan yıkama sürelerinin belirlenmesine dair hesap detayları 2017 yılı için aşağıda verilmiştir.

- 1.) Yıkamaların, 2,95 mL/dk yıkama debisi ile gerçekleştirileceği hesabından yola çıkılarak: Otomatik meteoroloji gözlem istasyonu verilerine göre 2017 yılında gerçekleşen toplam yağış miktarı 210,7 mm/m².yıl’dır. Suyun özgül ağırlığı 1 ton/m³ olup;

$$210,7 \text{ mm/m}^2.\text{yıl} = 210,7 \text{ kg/m}^2.\text{yıl} = 0,2107 \text{ ton/m}^2.\text{yıl} = \mathbf{210,7 \text{ litre/m}^2.\text{yıl}} \text{ olur.}$$

- 2.)

$$\begin{array}{ll} 1 \text{ m}^2/\text{ye} & 210,7 \text{ litre/yıl yağış düşerse} \\ 0,0176625 \text{ m}^2/\text{ye} & x \text{ litre/yıl yağış suyu düşer. O halde;} \end{array}$$

X= 3,72 litre/yıl kolon yüzeyine düşecek yağış suyu miktarıdır.

0,0176625 m² (15 cm çapa sahip kolonun $\pi.r^2$ formülüne göre hesaplanan yüzey alanıdır).

- 3.)

2,95 mL/dk. yıkama debisi ile ;

$$\begin{array}{ll} 4,24 \text{ L yıkama suyu} & 1 \text{ günde oluşuyor ise} \\ 3,72 \text{ L yıkama suyu} & X \text{ günde oluşur.} \end{array}$$

O halde;

$$X = 3,72 / 4,24 = \mathbf{0,878 \text{ gün}}$$

- 4.) 2,95 mL/dk. yıkama debisi ile 0,878 gün = **1264,2 dk (21 saat 4 dk)** yıkama yapılması gerekir.

Not 1: 10 litre/(m².saat) (yaklaşık 2,95 mL/dk) yıkama debisi, işletmede işlenen cevherin kolon yüzeyinde göllenme olmayacak şekilde sızdırabildiği optimum debi olduğu için seçilmiştir.

Kabul: Bir yıl boyunca kolon yüzeyine düşecek olan yağış suyunun aralıksız olarak bir defada kolon yüzeyine düşeceği kabul edilmiştir.

2018, 2019, 2020 ve 2021 yılları için yukarıda belirtilen hesap detayları tekrar edilerek yıkama süreleri hesaplanmıştır. Hesaplanan verilere göre 4 nolu kolonda yıkamalar sağlanmıştır.

3. Bulgular

3.1. 1 Nolu Kolon Testine Ait Bulgular

1 nolu kolon testi, 17.03.2022 tarihinde saat 12.30'da peristaltik pompadan yıkama işlemine start verilmesi suretiyle başlatılmıştır. 1 nolu kolon tabanında toplanan yıkama sularındaki Toplam CN değeri 19. Gün sonunda (05.04.2022 tarihinde) 0,095 ppm değeri ile <0,1 ppm değeri altına düşmüştür.

Yıkama işlemleri boyunca günlük olarak kolona beslenen besleme suyu miktarı, kolondan toplanan toplama suyu miktarı ve günlük gerçekleşen yıkama suyu debileri ile yıkama dönemi boyunca gerçekleşen ortalama değerler Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. 1 Nolu Kolonda Besleme ve Toplama Su Miktarlarına Esas Veriler

Okuma Tarihi	Okuma Saati	Besleme Suyu Miktarı (mL)	Toplanan Yıkama Suyu Miktarı (mL)	Günlük Gerçekleşen Yıkama Debisi (mL/dk.)
18.03.2022	12:30	4000	2600	2,78
19.03.2022	12:30	3360	3600	2,33
20.03.2022	12:30	4560	3850	3,17
21.03.2022	12:30	4000	3850	2,78
22.03.2022	12:30	4040	3950	2,81
23.03.2022	12:30	4140	3900	2,88
24.03.2022	12:30	4060	3750	2,82
25.03.2022	12:30	3850	3800	2,67
26.03.2022	12:30	3840	3750	2,67
27.03.2022	12:30	3930	3750	2,73
28.03.2022	12:30	3900	3800	2,71
29.03.2022	12:30	3780	3700	2,63
30.03.2022	12:30	3930	3950	2,73
31.03.2022	12:30	4150	3850	2,88
1.04.2022	12:30	3900	3750	2,71
2.04.2022	12:30	3890	3750	2,70
3.04.2022	12:30	3920	3800	2,72
4.04.2022	12:30	3970	3800	2,76
5.04.2022	12:30	3900	3850	2,71
Test Boyunca Gerçekleşen Ortalama Değerler		3954	3739	2,75

Test boyunca gerçekleşen ve yukarıdaki tabloda verilen beslenen ve toplanan yıkama suyu miktarları dikkate alındığında ulaşılan bulgular aşağıda paylaşılmıştır.

- 1 nolu kolona toplam 75.120 mL = 75,12 litre yeraltı suyu beslenmiştir.
- 1 nolu kolon tabanında 71.050 mL = 71,05 litre yıkama suyu toplanmıştır.
- 1 nolu kolona beslenen cevher atığı bünyesinde 75,12-71,05 = 4,07 litre yıkama suyu nem olarak kalmıştır.
- Yıkama süresi boyunca gerçekleşen günlük yıkama debileri dikkate alındığında 19 günlük test süreci ortalama yıkama debisi 2,75 mL/dk. olarak hesaplanmıştır.

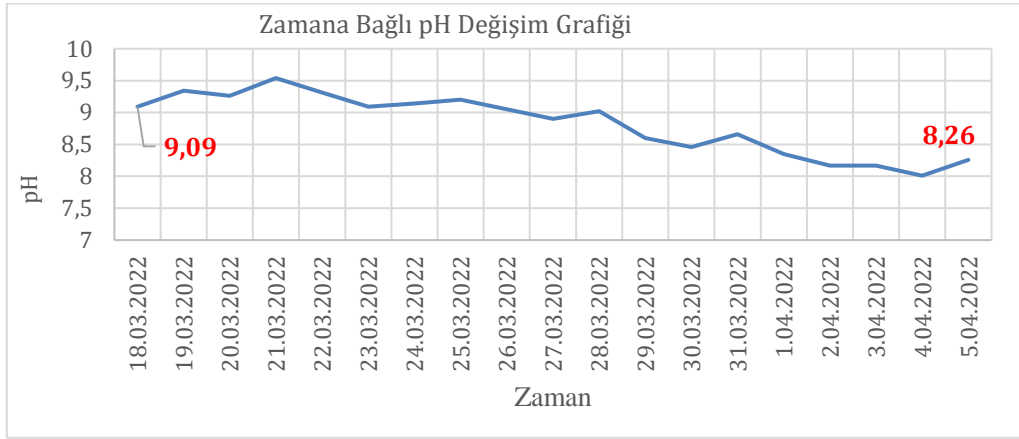
Testin başlangıcından bitişine kadar kolon tabanlarında toplanan yıkama sularından alınan numunelere ait pH ve Toplam CN analiz sonuçları Tablo 3 'de sunulmuştur.

Tablo 3. 1 Nolu Kolon Toplama Sularına Ait pH ve Toplam CN Analiz Sonuçları

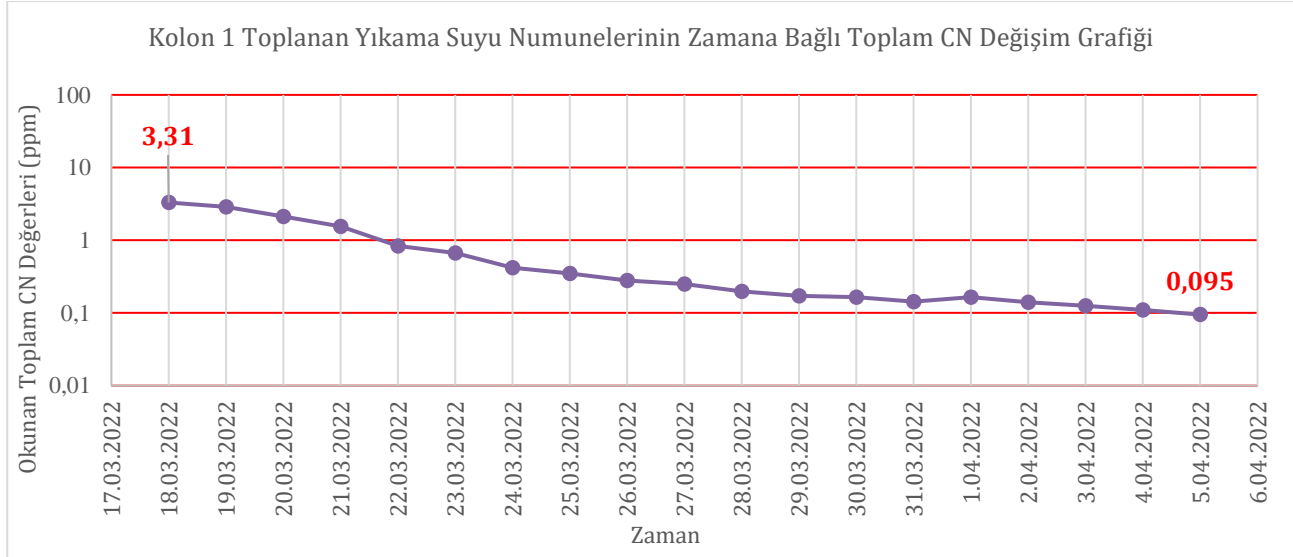
Gün	Tarih	Numune Adı	pH	Toplam Siyanür (TCN - ppm)
1	18.03.2022	Kolon 1 Toplanan Yıkama Suyu	9,09	3,31
2	19.03.2022	Kolon 1 Toplanan Yıkama Suyu	9,34	2,87
3	20.03.2022	Kolon 1 Toplanan Yıkama Suyu	9,26	2,13
4	21.03.2022	Kolon 1 Toplanan Yıkama Suyu	9,54	1,55

5	22.03.2022	Kolon 1 Toplanan Yıkama Suyu	9,31	0,84
6	23.03.2022	Kolon 1 Toplanan Yıkama Suyu	9,09	0,67
7	24.03.2022	Kolon 1 Toplanan Yıkama Suyu	9,14	0,42
8	25.03.2022	Kolon 1 Toplanan Yıkama Suyu	9,2	0,35
9	26.03.2022	Kolon 1 Toplanan Yıkama Suyu	9,05	0,28
10	27.03.2022	Kolon 1 Toplanan Yıkama Suyu	8,9	0,25
11	28.03.2022	Kolon 1 Toplanan Yıkama Suyu	9,02	0,198
12	29.03.2022	Kolon 1 Toplanan Yıkama Suyu	8,6	0,172
13	30.03.2022	Kolon 1 Toplanan Yıkama Suyu	8,46	0,165
14	31.03.2022	Kolon 1 Toplanan Yıkama Suyu	8,66	0,143
15	1.04.2022	Kolon 1 Toplanan Yıkama Suyu	8,35	0,165
16	2.04.2022	Kolon 1 Toplanan Yıkama Suyu	8,17	0,140
17	3.04.2022	Kolon 1 Toplanan Yıkama Suyu	8,17	0,125
18	4.04.2022	Kolon 1 Toplanan Yıkama Suyu	8,01	0,110
19	5.04.2022	Kolon 1 Toplanan Yıkama Suyu	8,26	0,095

Zamana bağlı pH ve Toplam CN değişim grafikleri, Şekil 4 ve Şekil 5 'de sunulmuştur.



Şekil 4. 1 Nolu Kolon Toplama Suyu Zamana Bağlı pH Değişim Grafiği



Şekil 5. 1 Nolu Kolon Toplama Suyu Zamana Bağlı Toplam CN Değişim Grafiği

Test boyunca gerçekleşen ve yukarıdaki tabloda verilen pH değerleri ve Toplam CN analiz sonuçları dikkate alındığında ulaşılan bulgular aşağıda paylaşılmıştır.

- Testin başladığı tarihten itibaren ilk 4 gün boyunca pH değerlerinde artış gözlemlenmiştir. İlk 4 gün ardından pH değerleri azalış trendi sergilemiş ve testin sonlandırıldığı tarihte pH değeri 8,26 olarak kayda alınmıştır.
- Testin başlangıcından itibaren alınan ilk numunenin Toplam CN analiz değeri 3,31 ppm olarak kayda alınmıştır.

- Testin başlangıcından itibaren birbirini takip eden tarihlerde Toplam CN değerleri hızlı bir düşüşe geçerek 5. gün sonunda (22.03.2022 tarihinde) 1 ppm değerinin altına düşmüştür.
- Toplam CN değeri, hedef değer olan <0,1 ppm altına ise 19. Gün sonunda (05.04.2022 tarihinde) düşmüştür.

3.2. 2 Nolu Kolon Testine Ait Bulgular

2 nolu kolon testi, 17.03.2022 tarihinde saat 12:30'da peristaltik pompadan yıkama işlemine start verilmesi suretiyle başlatılmıştır. 2 nolu kolon tabanında toplanan yıkama sularındaki Toplam CN değeri 42. gün sonunda (29.04.2022 tarihinde) 0,094 ppm değeri ile <0,1 ppm değeri altına düşmüştür.

Yıkama işlemleri boyunca günlük olarak kolona beslenen besleme suyu miktarı, kolondan toplanan toplama suyu miktarı ve günlük gerçekleşen yıkama suyu debileri ile yıkama dönemi boyunca gerçekleşen ortalama değerler Tablo 4'de sunulmuştur.

Tablo 4. 2 Nolu Kolonda Besleme ve Toplama Su Miktarlarına Esas Veriler

Okuma Tarihi	Okuma Saati	Besleme Suyu Miktarı (mL)	Toplanan Yıkama Suyu Miktarı (mL)	Günlük Gerçekleşen Yıkama Debisi (mL/dk.)
18.03.2022	12:30	4260	3250	2,96
19.03.2022	12:30	4200	4000	2,92
20.03.2022	12:30	4480	4200	3,11
21.03.2022	12:30	4400	4350	3,06
22.03.2022	12:30	4420	4350	3,07
23.03.2022	12:30	4380	4050	3,04
24.03.2022	12:30	4260	4150	2,96
25.03.2022	12:30	4140	4100	2,88
26.03.2022	12:30	4130	4000	2,87
27.03.2022	12:30	4260	4050	2,96
28.03.2022	12:30	4150	4050	2,88
29.03.2022	12:30	4000	3900	2,78
30.03.2022	12:30	4140	4100	2,88
31.03.2022	12:30	4400	4150	3,06
1.04.2022	12:30	4100	4000	2,85
2.04.2022	12:30	3970	3900	2,76
3.04.2022	12:30	4120	4000	2,86
4.04.2022	12:30	4100	3900	2,85
5.04.2022	12:30	4000	3950	2,78
6.04.2022	12:30	4050	3950	2,81
7.04.2022	12:30	4100	3950	2,85
8.04.2022	12:30	4000	4020	2,78
9.04.2022	12:30	4130	3950	2,87
10.04.2022	12:30	4000	4000	2,78
11.04.2022	12:30	4000	3950	2,78
12.04.2022	12:30	4100	3950	2,85
13.04.2022	12:30	4000	4000	2,78
14.04.2022	12:30	4000	3900	2,78
15.04.2022	12:30	4000	4000	2,78
16.04.2022	12:30	4500	4300	3,13
17.04.2022	12:30	4000	4150	2,78
18.04.2022	12:30	3930	3850	2,73
19.04.2022	12:30	4200	4000	2,92
20.04.2022	12:30	4300	4200	2,99
21.04.2022	12:30	4120	4100	2,86
22.04.2022	12:30	4200	4150	2,92
23.04.2022	12:30	4160	4150	2,89
24.04.2022	12:30	4200	4150	2,92
25.04.2022	12:30	4200	4100	2,92
26.04.2022	12:30	4100	4100	2,85
27.04.2022	12:30	4240	4150	2,94
28.04.2022	12:30	4230	4100	2,94
29.04.2022	12:30	4200	4100	2,92

Test Boyunca Gerçekleşen Ortalama Değerler	4160	4040	2,89
--	------	------	------

Test boyunca gerçekleşen ve yukarıdaki tabloda verilen beslenen ve toplanan yıkama suyu miktarları dikkate alındığında ulaşılan bulgular aşağıda paylaşılmıştır.

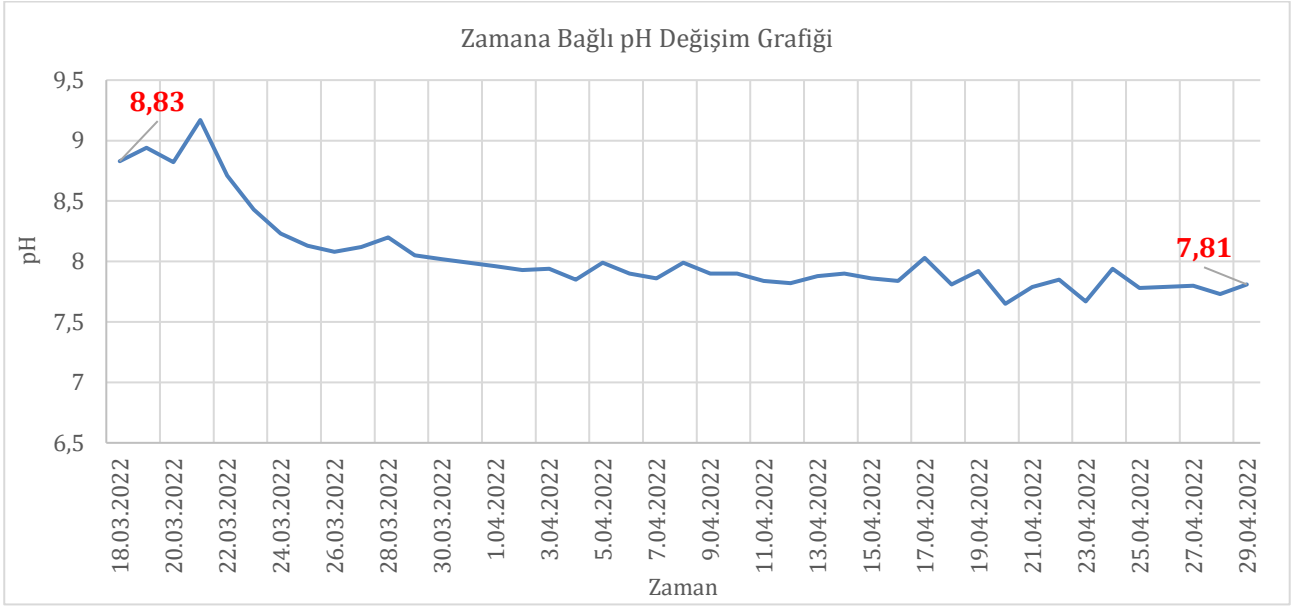
- 2 nolu kolona toplam 178.870 mL = 178,87 litre yeraltı suyu beslenmiştir.
- 2 nolu kolon tabanında 173.720 mL = 173,72 litre yıkama suyu toplanmıştır.
- 2 nolu kolona beslenen cevher atığı bünyesinde 178,87 - 173,72 = 5,15 litre yıkama suyu nem olarak kalmıştır.
- Yıkama süresi boyunca gerçekleşen günlük yıkama debileri dikkate alındığında 42 günlük test süreci ortalama yıkama debisi 2,89 mL/dk. olarak hesaplanmıştır.

Testin başlangıcından bitişine kadar kolon tabanlarında toplanan yıkama sularından alınan numunelere ait pH ve Toplam CN analiz sonuçları Tablo 5 'de sunulmuştur.

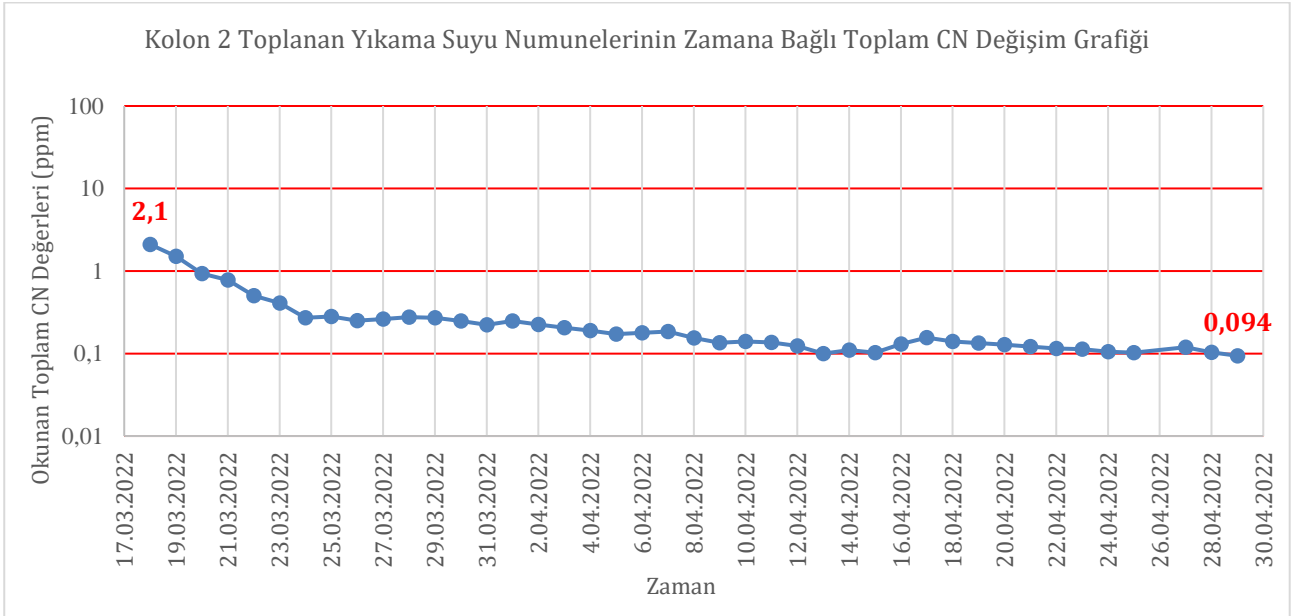
Tablo 5. 2 Nolu Kolon Toplama Sularına Ait pH ve Toplam CN Analiz Sonuçları

Sayı No	Tarih	Numune Adı	pH	Toplam Siyanür (TCN - ppm)
1	18.03.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	8,83	2,1
2	19.03.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	8,94	1,5
3	20.03.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	8,82	0,93
4	21.03.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	9,17	0,78
5	22.03.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	8,71	0,50
6	23.03.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	8,43	0,41
7	24.03.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	8,23	0,27
8	25.03.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	8,13	0,28
9	26.03.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	8,08	0,25
10	27.03.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	8,12	0,262
11	28.03.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	8,2	0,275
12	29.03.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	8,05	0,271
13	30.03.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	8,02	0,249
14	31.03.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	7,99	0,222
15	1.04.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	7,96	0,247
16	2.04.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	7,93	0,225
17	3.04.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	7,94	0,205
18	4.04.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	7,85	0,19
19	5.04.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	7,99	0,172
20	6.04.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	7,9	0,178
21	7.04.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	7,86	0,184
22	8.04.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	7,99	0,155
23	9.04.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	7,9	0,135
24	10.04.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	7,9	0,14
25	11.04.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	7,84	0,136
26	12.04.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	7,82	0,123
27	13.04.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	7,88	0,1
28	14.04.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	7,9	0,11
29	15.04.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	7,86	0,102
30	16.04.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	7,84	0,13
31	17.04.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	8,03	0,156
32	18.04.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	7,81	0,14
33	19.04.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	7,92	0,134
34	20.04.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	7,65	0,128
35	21.04.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	7,79	0,121
36	22.04.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	7,85	0,115
37	23.04.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	7,67	0,113
38	24.04.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	7,94	0,105
39	25.04.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	7,78	0,102
40	27.04.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	7,8	0,119
41	28.04.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	7,73	0,103
42	29.04.2022	Kolon 2 Toplanan Yıkama Suyu	7,81	0,094

Zamana bağlı pH ve Toplam CN değişim grafikleri, Şekil 6 ve Şekil 7 'de sunulmuştur.



Şekil 6. 2 Nolu Kolon Toplama Suyu Zamana Bağlı pH Değişim Grafiği



Şekil 7. 2 Nolu Kolon Toplama Suyu Zamana Bağlı Toplam CN Değişim Grafiği

Test boyunca gerçekleşen ve yukarıdaki tabloda verilen pH değerleri ve Toplam CN analiz sonuçları dikkate alındığında ulaşılan bulgular aşağıda paylaşılmıştır.

- Testin başladığı tarihten itibaren ilk 4 gün boyunca pH değerlerinde artış gözlemlenmiştir. İlk 4 gün ardından pH değerleri azalış trendi sergilemiş ve testin sonlandırıldığı tarihte pH değeri 7,81 olarak kayda alınmıştır.
- Testin başlangıcından itibaren alınan ilk numunenin Toplam CN analiz değeri 2,1 ppm olarak kayda alınmıştır.
- Testin başlangıcından itibaren birbirini takip eden tarihlerde Toplam CN değerleri hızlı bir düşüşe geçerek 3. gün sonunda (20.03.2022 tarihinde) 1 ppm değerinin altına düşmüştür.
- Toplam CN değeri, hedef değer olan <0,1 ppm altına ise 42. gün sonunda (29.04.2022 tarihinde) düşmüştür.

3.3. 3 Nolu Kolon Testine Ait Bulgular

3 nolu kolon testi, 17.03.2022 tarihinde saat 12.30'da peristaltik pompadan yıkama işlemine start verilmesi suretiyle başlatılmıştır. 3 nolu kolon tabanında toplanan yıkama sularındaki Toplam CN değeri 46. gün sonunda (03.05.2022 tarihinde) 0,088 ppm değeri ile <0,1 ppm değeri altına düşmüştür.

Yıkama işlemleri boyunca günlük olarak kolona beslenen besleme suyu miktarı, kolondan toplanan toplama suyu miktarı ve günlük gerçekleşen yıkama suyu debileri ile yıkama dönemi boyunca gerçekleşen ortalama değerler Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6. 3 Nolu Kolonda Besleme ve Toplama Su Miktarlarına Esas Veriler

Okuma Tarihi	Okuma Saati	Besleme Suyu Miktarı (mL)	Toplanan Yıkama Suyu Miktarı (mL)	Günlük Gerçekleşen Yıkama Debisi (mL/dk.)
18.03.2022	12:30	4200	3050	2,92
19.03.2022	12:30	4000	3700	2,78
20.03.2022	12:30	4300	4100	2,99
21.03.2022	12:30	4080	3850	2,83
22.03.2022	12:30	4220	4100	2,93
23.03.2022	12:30	4120	4050	2,86
24.03.2022	12:30	4040	3850	2,81
25.03.2022	12:30	4000	3800	2,78
26.03.2022	12:30	3820	3750	2,65
27.03.2022	12:30	3970	3900	2,76
28.03.2022	12:30	3780	3750	2,63
29.03.2022	12:30	3790	3700	2,63
30.03.2022	12:30	3890	3750	2,70
31.03.2022	12:30	4240	4050	2,94
1.04.2022	12:30	3850	3850	2,67
2.04.2022	12:30	3800	3750	2,64
3.04.2022	12:30	4040	3800	2,81
4.04.2022	12:30	4000	3800	2,78
5.04.2022	12:30	3820	3750	2,65
6.04.2022	12:30	3760	3800	2,61
7.04.2022	12:30	3925	3800	2,73
8.04.2022	12:30	3780	3800	2,63
9.04.2022	12:30	3820	3800	2,65
10.04.2022	12:30	3870	3750	2,69
11.04.2022	12:30	3800	3750	2,64
12.04.2022	12:30	3830	3750	2,66
13.04.2022	12:30	3920	3900	2,72
14.04.2022	12:30	3800	3750	2,64
15.04.2022	12:30	3780	3750	2,63
16.04.2022	12:30	4200	4100	2,92
17.04.2022	12:30	3830	3800	2,66
18.04.2022	12:30	3790	3650	2,63
19.04.2022	12:30	3900	4000	2,71
20.04.2022	12:30	4000	3950	2,78
21.04.2022	12:30	3930	3900	2,73
22.04.2022	12:30	4000	3900	2,78
23.04.2022	12:30	3970	3950	2,76
24.04.2022	12:30	3930	3850	2,73
25.04.2022	12:30	3930	3850	2,73
26.04.2022	12:30	3930	3850	2,73
27.04.2022	12:30	3980	3900	2,76
28.04.2022	12:30	4000	3900	2,78
29.04.2022	12:30	3950	3850	2,74
30.04.2022	12:30	3930	3800	2,73
1.05.2022	12:30	4000	3950	2,78
2.05.2022	12:30	3950	3850	2,74
3.05.2022	12:30	3950	3850	2,74

**Test Boyunca
Gerçekleşen Ortalama Değerler**

3945

3832

2,74

Test boyunca gerçekleşen ve yukarıdaki tabloda verilen beslenen ve toplanan yıkama suyu miktarları dikkate alındığında ulaşılan bulgular aşağıda paylaşılmıştır.

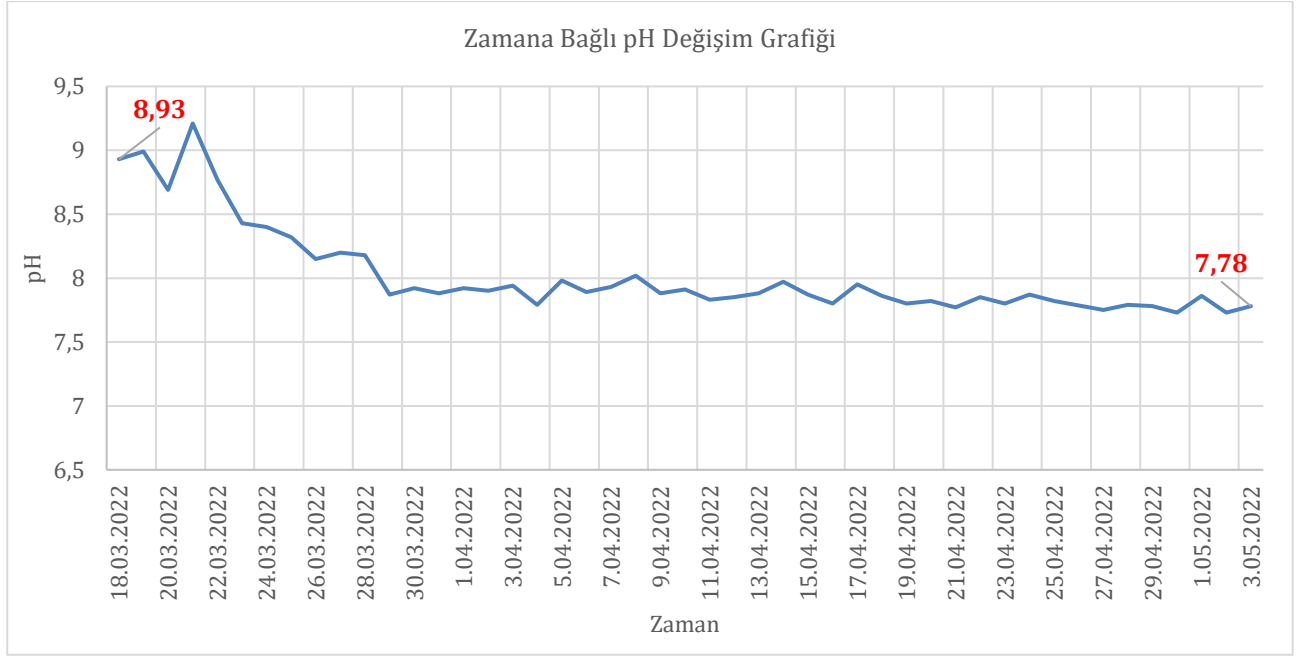
- 3 nolu kolona toplam 185.410 mL = 185,41 litre yeraltı suyu beslenmiştir.
- 3 nolu kolon tabanında 180.100 mL = 180,10 litre yıkama suyu toplanmıştır.
- 3 nolu kolona beslenen cevher atığı bünyesinde 185,41 – 180,10 = 5,31 litre yıkama suyu nem olarak kalmıştır.
- Yıkama süresi boyunca gerçekleşen günlük yıkama debileri dikkate alındığında 46 günlük test süreci ortalama yıkama debisi 2,74 mL/dk. olarak hesaplanmıştır.

Testin başlangıcından bitişine kadar kolon tabanlarında toplanan yıkama sularından alınan numunelere ait pH ve Toplam CN analiz sonuçları Tablo 7 'de sunulmuştur.

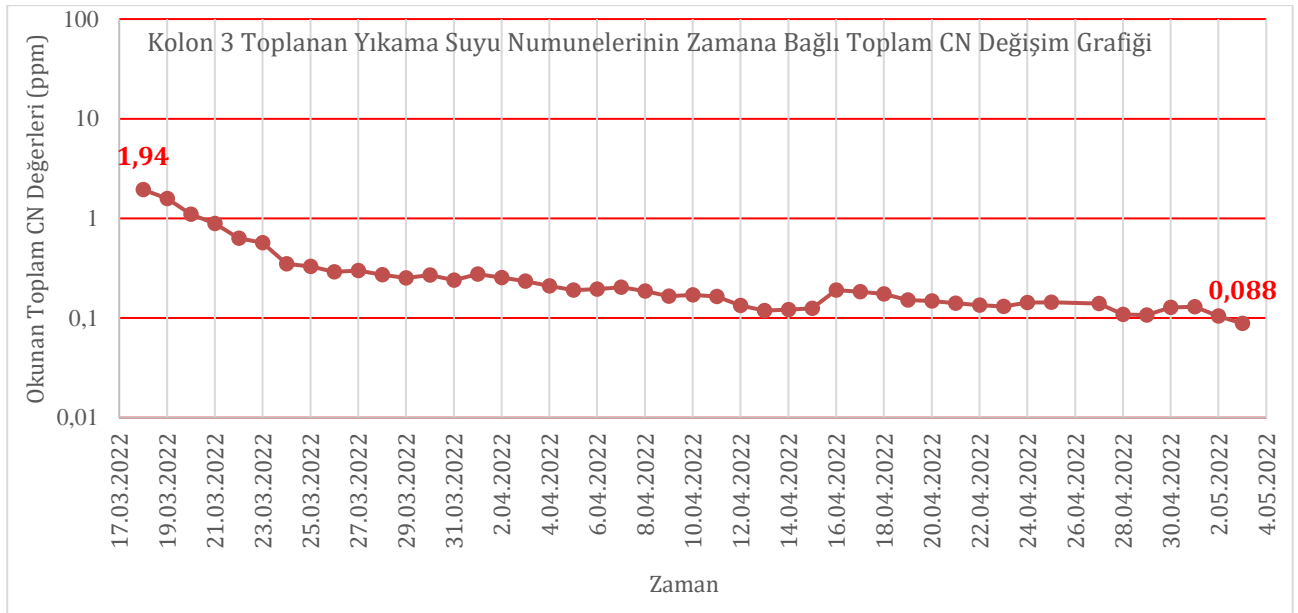
Tablo 7. 3 Nolu Kolon Toplama Sularına Ait pH ve Toplam CN Analiz Sonuçları

Sayı No	Tarih	Numune Adı	pH	Toplam Siyanür (TCN-ppm)
1	18.03.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	8,93	1,94
2	19.03.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	8,99	1,58
3	20.03.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	8,69	1,1
4	21.03.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	9,21	0,89
5	22.03.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	8,77	0,63
6	23.03.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	8,43	0,57
7	24.03.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	8,4	0,35
8	25.03.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	8,32	0,33
9	26.03.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	8,15	0,29
10	27.03.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	8,2	0,3
11	28.03.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	8,18	0,272
12	29.03.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	7,87	0,253
13	30.03.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	7,92	0,27
14	31.03.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	7,88	0,24
15	1.04.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	7,92	0,275
16	2.04.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	7,9	0,255
17	3.04.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	7,94	0,235
18	4.04.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	7,79	0,21
19	5.04.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	7,98	0,190
20	6.04.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	7,89	0,195
21	7.04.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	7,93	0,203
22	8.04.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	8,02	0,187
23	9.04.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	7,88	0,166
24	10.04.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	7,91	0,17
25	11.04.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	7,83	0,164
26	12.04.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	7,85	0,134
27	13.04.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	7,88	0,119
28	14.04.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	7,97	0,121
29	15.04.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	7,87	0,125
30	16.04.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	7,8	0,19
31	17.04.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	7,95	0,184
32	18.04.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	7,86	0,175
33	19.04.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	7,8	0,152
34	20.04.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	7,82	0,148
35	21.04.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	7,77	0,141
36	22.04.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	7,85	0,135
37	23.04.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	7,8	0,131
38	24.04.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	7,87	0,143
39	25.04.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	7,82	0,144
40	27.04.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	7,75	0,14
41	28.04.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	7,79	0,109
42	29.04.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	7,78	0,107
43	30.04.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	7,73	0,128
44	1.05.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	7,86	0,130
45	2.05.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	7,73	0,105
46	3.05.2022	Kolon 3 Toplanan Yıkama Suyu	7,78	0,088

Zamana bağlı pH ve Toplam CN değişim grafikleri, Şekil 8 ve Şekil 9 'da sunulmuştur.



Şekil 8. 3 Nolu Kolon Toplama Suyu Zamana Bağlı pH Değişim Grafiği



Şekil 9. 3 Nolu Kolon Toplama Suyu Zamana Bağlı Toplam CN Değişim Grafiği

Test boyunca gerçekleşen ve yukarıdaki tabloda verilen pH değerleri ve Toplam CN analiz sonuçları dikkate alındığında ulaşılan bulgular aşağıda paylaşılmıştır.

- Testin başladığı tarihten itibaren ilk 4 gün boyunca pH değerlerinde artış gözlemlenmiştir. İlk 4 gün ardından pH değerleri azalış trendi sergilemiş ve testin sonlandırıldığı tarihte pH değeri 7,78 olarak kayda alınmıştır.
- Testin başlangıcından itibaren alınan ilk numunenin Toplam CN analiz değeri 1,94 ppm olarak kayda alınmıştır.
- Testin başlangıcından itibaren birbirini takip eden tarihlerde Toplam CN değerleri hızlı bir düşüşe geçerek 4. gün sonunda (21.03.2022 tarihinde) 1 ppm değerinin altına düşmüştür.
- Toplam CN değeri, hedef değer olan <0,1 ppm altına ise 46. Gün sonunda (03.05.2022 tarihinde) düşmüştür.

3.4. 4 Nolu Kolon Testine Ait Bulgular

4 nolu kolon testi, 17.03.2022 tarihinde saat 12.30'da peristaltik pompadan yıkama işlemine start verilmesi suretiyle başlatılmıştır. Yıkama işlemi, 2,1. başlığı altında verilen detaylara uygun olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Yıkama işlemi 27.03.2022 tarihinde saat 00:50 'de tamamlanmıştır. Yıkama işlemi tamamlandıktan sonra 24 saatlik süre sonunda kolon tabanında biriken toplama suyundan numune alınmış ve numunede ki Toplam CN değeri 0,44 ppm olarak ölçülmüştür.

Yıkama işlemleri boyunca günlük olarak kolona beslenen besleme suyu miktarı, kolondan toplanan toplama suyu miktarı ve günlük gerçekleşen yıkama suyu debileri ile yıkama dönemi boyunca gerçekleşen ortalama değerler Tablo 8'de sunulmuştur.

Tablo 8. 4 Nolu Kolonda Besleme ve Toplama Su Miktarlarına Esas Veriler

Senaryo Yılı	Yıkama Süresi	Okuma Tarihi	Okuma Saati	Besleme Suyu Miktarı (mL)	Toplanan Yıkama Suyu Miktarı (mL)	Günlük Gerçekleşen Yıkama Debisi (mL/dk.)
2017	21 Sa 4 Dk	19.03.2022	09:30	3800	3200	3,01
2018	28 Sa 35 Dk	21.03.2022	14:00	5100	4500	2,97
2019	30 Sa 8 Dk	23.03.2022	20:00	5300	4750	2,93
2020	27 Sa 42Dk	25.03.2022	23:50	4800	4200	2,89
2021	24 Sa 51 Dk	28.03.2022	00:50	4400	4000	2,95
Test Boyunca Gerçekleşen Ortalama Değerler				4680	4130	2,95

Test boyunca gerçekleşen ve yukarıdaki tabloda verilen beslenen ve toplanan yıkama suyu miktarları dikkate alındığında ulaşılan bulgular aşağıda paylaşılmıştır.

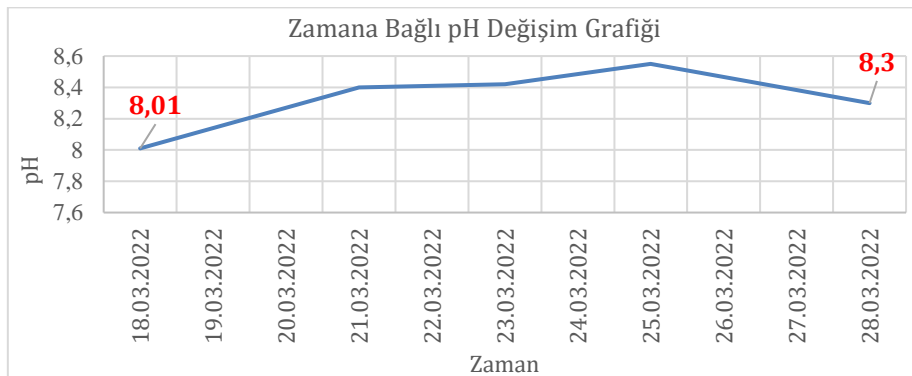
- 4 nolu kolona toplam 23.400 mL = 23,4 litre yeraltı suyu beslenmiştir.
- 1 nolu kolon tabanında 20.650 mL = 20,65 litre yıkama suyu toplanmıştır.
- 1 nolu kolona beslenen cevher atığı bünyesinde 23,4-20,65 = 2,75 litre yıkama suyu nem olarak kalmıştır.
- Yıkama süresi boyunca gerçekleşen yıkama debileri dikkate alındığında test süreci ortalama yıkama debisi 2,95 mL/dk. olarak hesaplanmıştır.

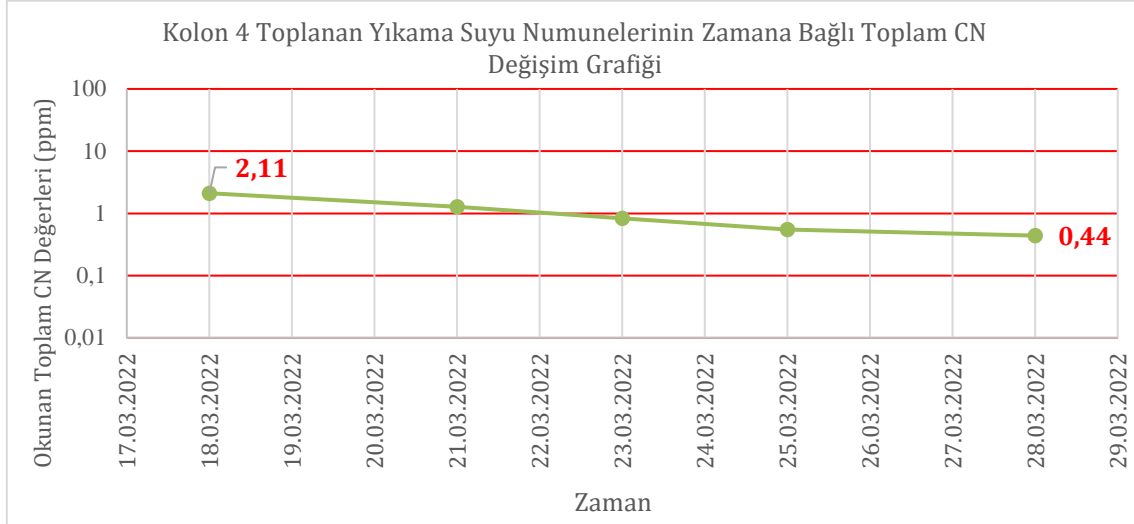
Testin başlangıcından bitişine kadar kolon tabanlarında toplanan yıkama sularından alınan numunelere ait pH ve Toplam CN analiz sonuçları Tablo 9 'da sunulmuştur.

Tablo 9. 4 Nolu Kolon Toplama Sularına Ait pH ve Toplam CN Analiz Sonuçları

Senaryo Yılı	Tarih	Numune Adı	pH	Toplam Siyanür (TCN-ppm)
2017	18.03.2022	Kolon 4 Toplanan Yıkama Suyu	8,01	2,11
2018	21.03.2022	Kolon 4 Toplanan Yıkama Suyu	8,4	1,27
2019	23.03.2022	Kolon 4 Toplanan Yıkama Suyu	8,42	0,83
2020	25.03.2022	Kolon 4 Toplanan Yıkama Suyu	8,55	0,55
2021	28.03.2022	Kolon 4 Toplanan Yıkama Suyu	8,3	0,44

Zamana bağlı pH ve Toplam CN değişim grafikleri, Şekil 10 ve Şekil 11 'de sunulmuştur.



Şekil 10. 4 Nolu Kolon Toplama Suyu Zamana Bağlı pH Değişim Grafiği**Şekil 11.** 4 Nolu Kolon Toplama Suyu Zamana Bağlı Toplam CN Değişim Grafiği

Test boyunca gerçekleşen ve yukarıdaki tabloda verilen pH değerleri ve Toplam CN analiz sonuçları dikkate alındığında ulaşılan bulgular aşağıda paylaşılmıştır.

- Okunan pH değerleri 8,01 ile 8,3 arasında değişmiştir. Testin sonlandırıldığı tarihte pH değeri 8,3 olarak kayda alınmıştır.
- Testin başlangıcından itibaren alınan ilk numunenin Toplam CN analiz değeri 2,11 ppm olarak kayda alınmıştır.
- Testin başlangıcından itibaren birbirini takip eden tarihlerde Toplam CN değerleri hızlı bir düşüşe geçerek 5 yıllık toplam yağış miktarları dikkate alınarak gerçekleştirilen yıkama işlemi neticesinde son alınan (28.03.2022 tarihinde) yıkama suyu numunesinde Toplam CN değeri 0,44 ppm olarak ölçülmüştür.

4. Tartışma ve Sonuç

4.1. Tartışma

Hatırlanacağı üzere, numune alma noktalarından birincisi, siyanür liç işlemleri en erken biten ve meteorolojik şartlar nedeniyle en az Toplam CN değeri beklenen bölge olarak seçilmiş ve 1 nolu numune bu bölgeden alınmıştır. Numune alma noktalarından ikincisi ise, siyanür liç işlemleri en geç biten bölge olan ve en yüksek Toplam CN değeri beklenen bölge olarak seçilmiş ve 2 nolu numune bu bölgeden alınmıştır. Ardından 1 ve 2 nolu numuneler eşit miktarlarda ve homojen olarak karıştırılmış ve 3 nolu numune elde edilmiştir. 1 nolu numune 1 nolu kolana, 2 nolu numune 2 nolu kolona ve 3 nolu numunede 3 ve 4 nolu kolonlara beslenerek testler başlatılmıştır.

Deneysel çalışmalara başlamadan evvel ortaya konulan, 1 nolu numunede ki Toplam CN değerlerinin daha düşük olacağı ve 2 nolu numunedeki Toplam CN değerlerinin daha yüksek olacağı öngörüsü ile örtüşecek şekilde test süreleri 1 nolu kolon için 19 gün ve 2 nolu kolon için 42 gün olarak gerçekleşmiştir. Diğer taraftan 1 ve 2 nolu numunelerin eşit miktarlarda karıştırılması ile elde edilen 3 nolu numunenin yüklenmesi ile yürütülen 3 nolu kolon testinde yıkama süresi 46 gün olarak kayda alınmıştır. Bu durum, 1 ve 2 nolu numuneler arasında baskın olan numunenin 2 nolu numune olduğu şeklinde açıklanabilir. Diğer taraftan, ilk üç kolonda gerçekleştirilen testler neticesinde altın madenciliğinde, yığın liç alanlarında işlenmiş maden atıklarının kolon testine tabi tutularak yeraltı suyu ile yıkanmasının mümkün olduğu ancak testlerin 40 kg'lık numuneler üzerinden gerçekleştirildiği ve bu durumun gerçek ölçekli yığın liç alanlarında uygulanmasının düşünülmesi halinde, ihtiyaç duyulan yeraltı suyu miktarı ve yıkama süreleri konularının bariyer olarak göze çarptığı görülmektedir.

4 nolu kolon testi sonuçlarına bakıldığında, son 5 yıllık gerçekleşen yağış verilerine göre hesaplanan 23,4 litre saf su ile 5,5 gün sürede gerçekleştirilen yıkama işlemi neticesinde yıkamanın son günü sonunda alınan numunedeki Toplam CN değerinin 0,44 ppm'e düştüğü görülmektedir. Bu durum, bölgeye düşen yağışlar ile yığın liç alanlarında işlenmiş maden atıklarından süzülecek olan sulardaki Toplam CN değerlerinin istenen seviyelere düşebileceğini göstermektedir. Bu çalışmanın son 5 yıllık gerçekleşen yağış verileri dikkate alınarak oluşturulan yıkama senaryosu üzerinden gerçekleştirildiği düşünüldüğünde gerçekleşen yağış miktarlarının daha uzun yıllar için

belirlenerek testin tekrarlanması halinde daha olumlu sonuçlar elde edilebileceği düşünülmektedir. Ayrıca hesaplarda kullanılan yağış miktarları bölgede yer alan otomatik meteoroloji gözlem istasyonunda kayda alınan yağış verileri olup bu istasyonda kayda alınan kar yüksekliği verileri hesaplara dâhil edilmemiştir. Bölgeye yağın son 5 yıllık kar yağışı verileri de hesaba dâhil edilerek oluşturulacak yeni yıkama senaryolarına göre testlerin tekrarlanması halinde yıkamanın son günü sonunda alınan numunedeki Toplam CN değerlerinin yasal otoriteler tarafından istenen seviyelere düşebileceği öngörülmektedir.

4.1. Sonuç

Gerçekleştirilen bu çalışmada, Türkiye’de yığın liç yöntemi ile dore metali üretimi gerçekleştiren bir işletmenin yığın liç alanlarından, liç işlemine tabi tutulmuş cevher atığı örnekleri alınarak bu örneklerin kolon testine tabi tutulması sağlanmıştır. Deneysel çalışmalarda birbirleri ile eşdeğer kolonlar kullanılmış olup kolonlara ait yükseklik 2 metre, kolon çapları ise 15 cm’dir. 1,2 ve 3 nolu kolonlarda yıkama işlemi, bölgeden temin edilen yeraltı suyu kuyusundan çekilen sular ile kolon tabanlarında biriken yıkama suyu numunelerinde ki Toplam CN değeri <0,1 ppm değerine ulaşıncaya kadar sürekli olarak gerçekleştirilmiştir. 4 nolu kolonda ise, yine işletmenin bulunduğu bölgeye son 5 yılda düşen yağış miktarları dikkate alınarak hesaplanan yıkama suyu miktarları kadar yıkama işlemi, kesikli olarak uygulanmıştır.

Kolon testleri neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- 1 nolu kolona, YLA’da liç işlemleri en erken biten bölgeden alınan cevher atığı (1 nolu numune) beslenmiştir. Cevher atığı numunesi, bölge yüzeyi JCB ile kazılarak yüzeyin bir metre altından alınmıştır. 1 nolu kolonda yıkama işlemi 17.03.2022 tarihinde saat 12:30 ‘da başlatılmıştır. Bir günlük yıkama neticesinde alınan yıkama suyu numunesine ait Toplam CN değeri 3,31 ppm olarak tespit edilmiştir. Kolonda 19 günlük bir yıkama neticesinde Toplam CN değeri 0,095 ppm değeri ile <0,1 ppm altına düşmüştür. 1 nolu kolona yerleştirilen 40 kg ‘lık liç işlemine tabi tutulmuş cevher atığının yıkanması neticesinde oluşan yıkama sularında ki Toplam CN miktarının <0,1 ppm altına düşürülmesi için yıkama işlemi boyunca toplam 75,12 litre yeraltı suyu tüketilmiştir.
- 2 nolu kolona, YLA’da liç işlemleri en geç biten bölgeden alınan, liç işlemi tamamlanmış cevher atığı (2 nolu numune) beslenmiştir. Cevher atığı numunesi, mevsimsel şartlara bağlı olarak, numune alınacak olan bölgede iş makinesi kullanımının iş güvenliği riskleri oluşturması nedeniyle bölge yüzeyinden kürekler yardımıyla alınmıştır. 2 nolu kolonda yıkama işlemi 17.03.2022 tarihinde saat 12.30 ‘da başlatılmıştır. Bir günlük yıkama neticesinde alınan yıkama suyu numunesine ait Toplam CN değeri 2,1 ppm olarak tespit edilmiştir. Kolonda 42 günlük bir yıkama neticesinde Toplam CN değeri 0,094 ppm değeri ile <0,1 ppm altına düşmüştür. 2 nolu kolona yerleştirilen 40 kg ‘lık liç işlemine tabi tutulmuş cevher atığının yıkanması neticesinde oluşan yıkama sularında ki Toplam CN miktarının <0,1 ppm altına düşürülmesi için yıkama işlemi boyunca toplam 178,87 litre yeraltı suyu tüketilmiştir.
- 3 nolu kolona, yukarıda ifade edilen 1 ve 2 nolu numune homojen ve eşit miktarlarda karıştırılarak beslenmiştir. 3 nolu kolonda yıkama işlemi 17.03.2022 tarihinde saat 12.30 ‘da başlatılmıştır. Bir günlük yıkama neticesinde alınan yıkama suyu numunesine ait Toplam CN değeri 1,94 ppm olarak tespit edilmiştir. Kolonda 46 günlük bir yıkama neticesinde Toplam CN değeri 0,088 ppm değeri ile <0,1 ppm altına düşmüştür. 3 nolu kolona yerleştirilen 40 kg ‘lık liç işlemine tabi tutulmuş cevher atığının yıkanması neticesinde oluşan yıkama sularında ki Toplam CN miktarının <0,1 ppm altına düşürülmesi için yıkama işlemi boyunca toplam 185,41 litre yeraltı suyu tüketilmiştir.
- 4 nolu kolona, yukarıda ifade edilen 1 ve 2 nolu numune homojen ve eşit miktarlarda karıştırılarak beslenmiştir. 4 nolu kolonda yıkama işlemi 17.03.2022 tarihinde saat 12.30 ‘da bölgeye düşen yağış miktarları dikkate alınarak oluşturulan yıkama senaryosuna uygun olacak şekilde başlatılmıştır. Gerçek verilerden yola çıkılarak hesaplanan yıkama suyu miktarları sırası ile 2017; 2018; 2019; 2020; 2021 yılları için 3,8; 5,1; 5,3; 4,8; 4,4 litre şeklinde olup 5 yıllık toplam yıkama suyu miktarı 23,4 litredir. 2017 yılı için hesaplanan 3,8 litre yıkama suyu miktarının kolondan geçirilmesi neticesinde toplanan yıkama suyu numunesine ait Toplam CN değeri 2,11 ppm olarak tespit edilmiştir. Kolondan son 5 yıl için hesaplanan toplam 23,4 litre saf suyun geçirilmesi neticesinde toplanan yıkama suyu numunesine ait Toplam CN değeri 0,44 ppm olarak tespit edilmiştir. Bir diğer ifadeyle, 5 nolu kolona yerleştirilen 40 kg ‘lık liç işlemine tabi tutulmuş cevher atığının, son 5 yıl içinde gerçekleşen yağış miktarlarından yola çıkılarak hesaplanan 23,4 litre saf su ile yıkanması neticesinde toplanan yıkama suyu numunesine ait Toplam CN değeri, 0,44 ppm olarak tespit edilmiştir.

Gerçekleştirilen 4 farklı kolon testi kapsamında ulaşılan sonuçlara esas veriler Tablo 10’da gösterilmiştir.

Tablo 10. Kolon Testleri Neticesinde Elde Edilen Veriler

Test Adı	Kolona Yüklenen Cevher Atığı Numunesi	Yıkama Suyu Cinsi	Yıkama Suyu Miktarı (litre)	Yıkama Süresi (gün)	Yıkama İşlemi 1. Gün Okunan Toplam CN (ppm)	Yıkama İşlemi Son Gün Okunan Toplam CN (ppm)
1 Nolu Kolon Testi	1 Nolu Numune	Ham Su	75,12	19	3,31	0,095
2 Nolu Kolon Testi	2 Nolu Numune	Ham Su	178,87	42	2,1	0,094
3 Nolu Kolon Testi	3 Nolu Numune	Ham Su	185,41	46	1,94	0,088
4 Nolu Kolon Testi	3 Nolu Numune	Saf Su	23,4	5,5	2,11	0,44

Elde edilen sonuçlar irdelendiğinde, yığın liç alanlarının yeraltından çekilen sular ile yıkılarak Toplam CN değerinin <0,1 ppm altına düşürülebileceği ancak bu yaklaşımın yığın liç alanlarından depolanan işlenmiş cevher atıkları toplam miktarı dikkate alındığında, sürdürülebilir kaynakların kullanımı ve toplam yıkama süreleri açısından çok çevreci bir yaklaşım olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. 4 nolu kolon yıkama testi sonuçları dikkate alındığında, yıkama işleminin doğal meteorolojik şartlar altında kontrollü bir şekilde yapılması halinde, liç alanlarındaki Toplam CN değerinin doğal olarak istenen değerlere düşebileceği görülmüştür. Doğal yıkama işlemleri ardından, liç alanlarının yüzey geçirimsizliklerinin tekniğine uygun şekilde inşa edilmesi, alan yüzeylerinin bölge iklimine uygun bitki türleri ile rehabilite edilmesi ve liç alanı etrafında bulunan su kalitesinin belli dönemlerde takip edilmesi ile verimli bir kapama dönemi ve kapama sonrası izleme dönemi tesis edilebilir.

Kaynakça

- [1] Logsdon, M. J., Hagelstein K., Mudder, T. I., 1999. Altın Üretiminde Siyanür Yönetimi., International Council on Metals and the Environment Canada, 44 s.
- [2] Akcil, A., 2002. Türk altın madenciliğinde siyanürleme işleminin ilk olarak uygulanması ve bunun çevreye etkileri., Minerals Engineering, 15: 695- 698.
- [3] Karakaya, E., 2004. Altın Madenciliği Atıksularında Hidrojen Peroksit Ve Bakır Kaplanmış Pomza Taşı İle Siyanür Giderimi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 81 s.
- [4] Orloff, K. G., Kaplan. B., Kowalski. P., 2005. Hydrogen cyanide in ambient air near a gold heap leach field: Measured vs. modeled concentrations. Atmospheric Environment, 3022 – 3029
- [5] Dam, R. V., Hogan. A., Harford. A., Markich. S., 2008. Toxicity and metal speciation characterisation of waste water from an abandoned gold mine in tropical northern Australia. Chemosphere, 305-313
- [6] Sayiner, B., 2012. Siyanür Liçinde Altının Aktif Karbona Adsorpsiyonunda Çeşitli Metallerin Etkisinin Araştırılması. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 101 s.
- [7] Kekeç, M., 2014. Altın Madeni İşletmeciliğinden Kaynaklanan Çevresel Etkilerin Değerlendirilmesi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş, 70s.
- [8] Erkan, E., 2015. Altın Yığın Liçi Projesinde Farklı Kırma Boylarının Verimlilik Ve Geçirimsizlik Performanslarının İncelenmesi. Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 110 s.
- [9] Koç, E., 2016. Siyanür Liçi Çözeltilerinden Metallerin Çöktürülmesi Ve Siyanürün Geri Kazanımı. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon, 103 s.
- [10] Donata, D.B., Madden-Hallet. D.M., Smith. G.B., Gursansky. W., 2017. Heap leach cyanide irrigation and risk to wildlife: Ramifications for the international cyanide management code. Ecotoxicology and Environmental Safety, 271-278
- [11] Karakaya, E., 2004. Altın Madenciliği Atıksularında Hidrojen Peroksit Ve Bakır Kaplanmış Pomza Taşı İle Siyanür Giderimi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 81 s.
- [12] Şendur, G., 2020. Düşük Tenörlü Altın Cevherinin Liç Davranışı: Kolon Ve Tank Liçinin Performanslarının Karşılaştırılması. Muğla Sıtkı Koçman University Graduate School Of Applied And Natural Sciences, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, 101 s.
- [12] Koçan, F., 2021. Siyanür ile cevherden altın üretiminin çevresel etkileri. Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 13 (1): 250-264

Bir Rüzgâr Türbinine ait Kanat Hatve Açısının AHA Tabanlı PID Tipi Denetleyiciler ile Optimal Kontrolü

Selim Soylu*¹

*¹ Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği, AKSARAY

(Alınış / Received: 22.06.2023, Kabul / Accepted: 31.08.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 31.08.2023)

Anahtar Kelimeler

Rüzgâr Türbini,
PID Tipi Denetleyiciler,
Kanat Hatve Açısı,
Optimal Kontrol

Öz: Bu çalışmada, bir rüzgâr türbinine ait kanat hatve açısı zamanla değişen rüzgâr hızı varlığında kontrol edilmeye çalışılmıştır. Böylece rüzgâr türbin sisteminin çıkış gücünün nominal çıkış gücünde tutulması ve oluşabilecek zararlardan sistemin korunması amaçlanmıştır. Bu amaçla PD (oransal-türevsel), PI (oransal-integral) ve PID (oransal-türevsel-integral) denetleyici yapıları kullanılmıştır. Denetleyicilere ait parametreler literatürde oldukça yeni olan metasezgisel optimizasyon algoritması olan yapay sinek kuşu algoritması (Artificial Hummingbird Algorithm-AHA) ile optimize edilmiştir. Her üç denetleyiciye ait parametrelerin optimizasyonu için 30 bağımsız yürütme gerçekleştirilmiş ve bu yürütmelere ait istatistiksel veriler değerlendirilmiştir. Rüzgâr türbininin modellenmesi, optimizasyonu ve kontrol çalışmaları Matlab/Simulink'te gerçekleştirilmiştir. AHA tabanlı PD denetleyici (AHA-PD) sistemin geçiş cevabında en düşük maksimum aşmaya ve en hızlı oturma süresine sahiptir. Bu bulgulara göre AHA-PD rüzgâr türbini çıkış gücünün nominal seviyesinin takibi için kanat hatve açısının kontrolünde daha başarılı sonuçlar üretmiştir.

Optimal Control of Blade Pitch Angle of a Wind Turbine with AHA Based PID Type Controllers

Keywords

Wind Turbine,
PID Type Controllers,
Blade Pitch Angle,
Optimal Control.

Abstract: In this study, the blade pitch angle of a wind turbine was tried to be controlled in the presence of time-varying wind speed. Thus, it is aimed to maintain the output power of the wind turbine system at its nominal output power and to protect the system from potential damages. For this purpose, PD (proportional-derivative), PI (proportional-integral) and PID (proportional-derivative-integral) controller structures were used. The parameters of the controllers are optimized with Artificial Hummingbird Algorithm (AHA), which is a brand-new metaheuristic optimization algorithm in the literature. 30 independent runs were performed for the optimization process and the statistical data of these runs were evaluated. Modeling, optimization, and control studies of the wind turbine were carried out in Matlab/Simulink. The AHA-based PD controller (AHA-PD) has the lowest maximum overshoot and the fastest settling time in the transient response of the system. According to these results, the AHA-PD has produced better results in controlling the blade pitch angle for tracking the nominal level of wind turbine output power.

*İlgili Yazar email: selimsoylu@aksaray.edu.tr

1. Giriş

Yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi günden güne artmaktadır. Bu kaynaklar arasında öne çıkan bir enerji türü de rüzgâr enerjisidir. Rüzgâr enerjisi, atmosfere salınan CO₂ emisyonunda sebep olduğu azalmalar da göz önünde bulundurulduğunda oldukça çevre dostu bir enerji kaynağıdır. Geçmişte ilk yatırım maliyetlerindeki yüksekliğe rağmen, hem gelişen teknolojiyle bu maliyetlerin azalmış olması hem de üretimi sonrasında hammaddeye ihtiyaç duymaması sebebiyle rüzgâr türbinleri elektrik enerjisi üretiminde öne çıkmaktadır [1,2].

Rüzgâr türbinleri hızlarına göre sabit hızlı ve değişken hızlı olmak üzere iki kategoriye ayrılır. Değişken hızlı rüzgâr türbinleri şebekeye doğrudan bağlanabilme, enerji verimliliğinin sabit hızlılara göre daha yüksek olması gibi avantajlara sahiptir [3]. Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde rüzgâr hızı da değişken olduğu için kanat hatve açısının kontrol edilmesi gerekmektedir. Kanat hatve açısının kontrolündeki amaç rüzgâr hızı nominal rüzgâr hızının altında olduğu bölgelerde çıkış gücünün optimize edilmesi için maksimum güç noktası takibi (MPPT) yapmak, nominal hıza ulaştığı ve bu hızı aştığı durumlarda ise rotor gücünü tasarım limitlerinin izin verdiği sınırlarda tutmaktır [4,5].

Kanat hatve açısının kontrolü amacıyla literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Klasik oransal-integral (PI) denetleyici [4-8], oransal-türevsel-integral (PID) denetleyici [7,9], bulanık mantık denetleyici [10,11], bulanık mantık tabanlı PI-PID tipi hibrit denetleyiciler [6,12] ve doğrusal karesel regülatör (LQR) [13] denetleyici bunlardan bazılarıdır. Bunların yanında son yıllarda rüzgâr türbinlerinde kanat hatve açısı kontrolü amacıyla çeşitli metasezgisel optimizasyon teknikleri de kullanılmaktadır. Genetik algoritma [7,14,15] ve parçacık sürü optimizasyonu (PSO) algoritması [16,17] başta olmak üzere birçok metasezgisel algoritma yukarıda bahsedilen denetleyici yapılarının performanslarını artırmak amacıyla kullanılmıştır. Klasik tekniklere nazaran sahip oldukları potansiyel sebebiyle de kullanımları günden güne artmaktadır [18]. Önemle belirtmek gerekir ki optimizasyon algoritmaları stokastik yapıya sahiptir ve her yürütmede aynı sonuçlar elde edilememektedir. Yukarıda bahsi geçen çalışmalarda ve literatürdeki diğer birçok çalışmada metasezgisel optimizasyon algoritmaları optimal denetleyici parametrelerini bulmak için ya bir defa yürütülmüş ya da kaç defa yürütüldüğü belirtilmemiştir. Bir algoritmanın optimal parametre tahmininde etkinliği ve verimliliğinin test edilmesi açısından ortalama 30 kez yürütülmesi ve bu bağımsız yürütmelere ait istatistiksel verilerin toplanıp değerlendirilmesi gerekmektedir [19-21].

Bu çalışmada, kanat hatve açısının kontrolü amacıyla PD, PI ve PID denetleyici yapıları önerilmiştir. Denetleyicilere ait ilgili parametreler literatüre 2022 yılında kazandırılmış, oldukça yeni bir metasezgisel algoritma olan yapay sinek kuşu algoritması (Artificial Hummingbird Algorithm-AHA) ile optimize edilmiştir. Yukarıda bahsedilen çalışmalar da göz önünde bulundurularak optimizasyon için 30 bağımsız yürütme gerçekleştirilmiş ve bu yürütmelere ait istatistiksel veriler kaydedilmiştir. Böylece hem sonuçların güvenilirliği sağlanmaya çalışılmış hem de AHA'nın her üç denetleyici yapısına ait parametreleri optimize etmedeki etkinliği doğru bir şekilde incelenmeye çalışılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Rüzgâr türbini

Aerodinamik teorileri göz önünde bulundurularak bir rüzgâr türbini tarafından elde edilen mekanik güç Denklem 1 ile tanımlanmaktadır [22]:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \beta) v^3 \quad (1)$$

Burada ρ , A ve v sırasıyla hava yoğunluğu (kg/m^3), rüzgâr türbini kanatlarının süpürdüğü alan (m^2) ve rüzgâr hızıdır (m/s). $C_p(\lambda, \beta)$, deneysel olarak belirlenen ve genellikle doğrusal olmayan rüzgâr türbini güç katsayısıdır. Kanat uç-hız oranı λ ile kanat hatve açısı β 'nin bir fonksiyonu olarak Denklem 2'deki gibi elde edilebilen güç katsayısı C_p için maksimum değer Betz limitinin belirlediği sınır olan %59'u geçemez [23].

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \quad (2)$$

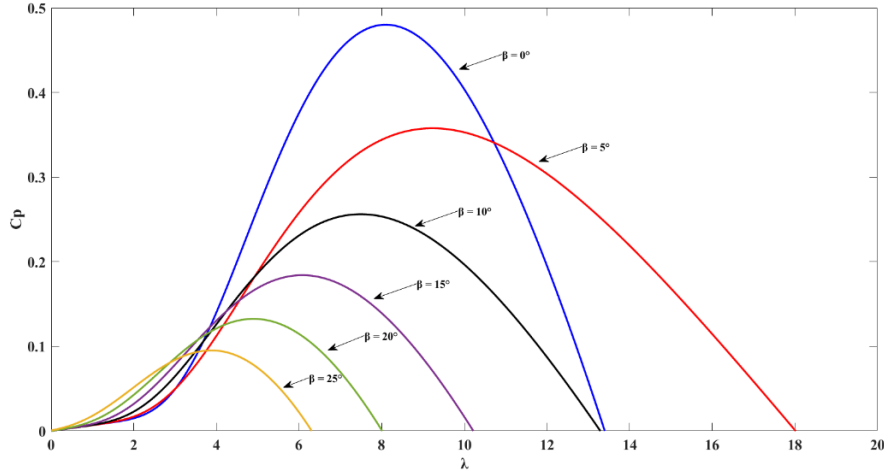
$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} + \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (3)$$

Kanat uç-hız oranı λ , kanat açılal hızının rüzgâr hızına oranıdır ve Denklem 4'teki gibi verilmiştir:

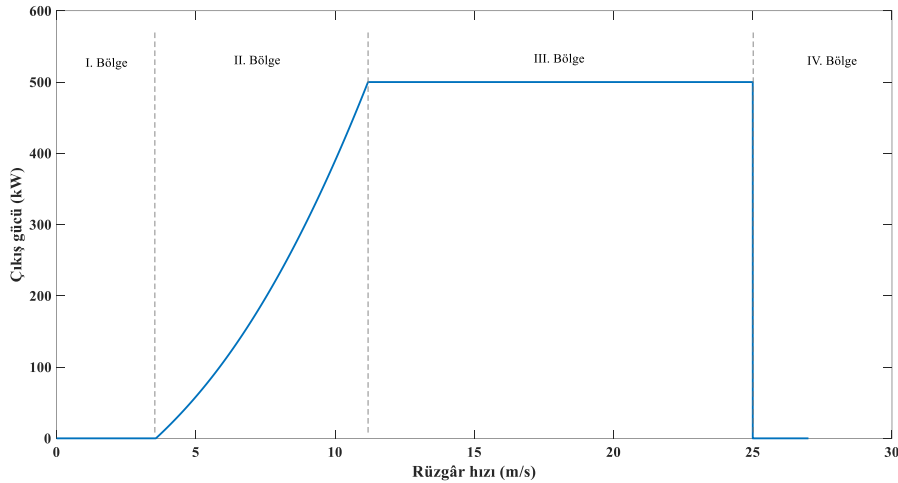
$$\lambda = \frac{w_t R}{v} \quad (4)$$

Burada w_t açılal hız (rad/s), R ise kanat yarıçapıdır (m). Şekil 1' de farklı β değerleri için güç katsayısı ve kanat uç-hız oranı değişim eğrileri verilmiştir.

Rüzgâr hızının ve kanat hatve açısının değişmesi mekanik çıkış gücünde değişikliğe sebep olmaktadır. Şekil 2’de örnek olarak nominal gücü 500 kW olan bir rüzgâr türbininin değişen rüzgâr hızına karşılık çalışma bölgeleri gösterilmektedir. I. Bölgede rüzgâr hızı türbini devreye alma hızından düşük olduğu için burada çıkışta güç yoktur. II. Bölge, türbinin devreye girdiği nokta ile nominal güce ulaştığı nokta arasındadır. Bu bölgede hızın artması gücün de artmasına neden olur ve MPPT gereklidir. MPPT, güç katsayısını maksimum değerde tutabilecek güç elektroniği devreleriyle gerçekleştirilir. III. Bölge ise rüzgâr hızlarının nominal gücü veren rüzgâr hızlarından yüksek olduğu nokta ile türbinin güvenlik sebebiyle kesime gittiği nokta arasındaki bölgedir. Bu bölgede tasarım sınırları dahilinde gücün nominal güce tutulması için kontrol sistemleri gerekmektedir. Son bölge olan IV. Bölge’de ise rüzgâr türbini güvenlik nedeniyle kapatılmaktadır [24,25].



Şekil 1. Farklı β değerleri için güç katsayısı C_p .



Şekil 2. 500 kW nominal güce sahip bir rüzgâr türbininin çalışma bölgeleri.

2.2. Eyleyici modeli

Türbin kanatlarının ayarlanan eksen boyunca hareketi için elektriksel ya da hidrolik eyleyici sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada kanatların ve kanat hatve açılarının dinamik davranışının doğrusal olduğu kabul edilerek pozisyon transfer fonksiyonu Denklem 5’te verilen bir dc servo motor eyleyici olarak kullanılmıştır [6].

$$G_p(s) = \frac{1}{s(s+1)} \quad (5)$$

2.3. PD, PI ve PID denetleyici yapıları

Literatürde yaygın olarak kullanılan klasik PD, PI ve PID denetleyiciler kontrol edilmek istenen proses çıkışı ile set noktası arasındaki hatayı düzelterek sistemi istenilen koşullarda tutmaya çalışırlar. PD, PI ve PID denetleyici yapılarının kontrol fonksiyonları sırasıyla Denklem 6-8’de verilmiştir [26].

$$u_{PD}(t) = K_p e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (6)$$

$$u_{PI}(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (7)$$

$$u_{PID}(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (8)$$

Bu denklemlerde $u(t)$ ilgili denetleyicinin kontrol çıkışı, $e(t)$ t anındaki arzu edilen giriş (set noktası) ile proses çıkışı arasındaki hata, K_P oransal kazanç, K_I integral kazancı ve K_D türevsel kazanç parametreleridir. Bahsi geçen her bir kazanç parametresi; yükselme süresi, yerleşme süresi, aşma, kararlılık ve kararlı hal hatası gibi kapalı döngü sistem cevabına ait kriterleri bireysel olarak etkilemektedir. Bu etkiler Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Kontrol terimlerinin sistem cevabı üzerine bireysel etkileri [27].

Kapalı döngü cevabı	Yükselme süresi	Aşma	Yerleşme süresi	Kararlı hal hatası	Kararlılık
Artan K_P ile	Azalır	Artar	Az değişir	Azalır	Azalır
Artan K_I ile	Azalır	Artar	Artar	Yok olur	Azalır
Artan K_D ile	Az değişir	Azalır	Azalır	Az değişir	Artar

2.3. Yapay sinek kuşu algoritması (AHA)

Zhao ve arkadaşları [28] tarafından yapılan çalışmayla literatüre kazandırılan AHA, doğada sinek kuşlarının uçuş becerilerini ve zeki yiyecek arama stratejilerini taklit eden metasezgisel bir optimizasyon tekniğidir. Bu oldukça yeni algoritmanın biyolojik altyapısı mevcut diğer algoritmalarından oldukça farklıdır. AHA’nın güdümlü yiyecek arama, bölgesel yiyecek arama ve göç yiyecek arama olmak üzere üç çeşit yiyecek arama stratejisi vardır. Bu yiyecek arama davranışları boyunca, arama sürecini etkin bir şekilde yürütmek için eksenel, çapraz ve çok yönlü uçuş olmak üzere üç farklı uçuş becerisi kullanılır. AHA’nın bir diğer önemli farkı keşif ve sömürdür. Güdümlü arama stratejisinde keşif erken aşamalarda yapılırken, sömürü sonraki aşamalarda gerçekleştirilir. Öte yandan, bölgesel yiyecek arama stratejisi keşifleri geliştirir ve göç yiyecek arama, sömürüyü artırır. AHA’nın diğer ayrımı, hafıza mekanizması ile ilgilidir. Sinek kuşlarının besin kaynakları için bellek mekanizmasını modellemek için bir ziyaret tablosu oluşturulmuştur. Her sinek kuşu, diğer sinek kuşlarının ilgili besin kaynağını en son ne zaman ziyaret ettiğini öğrenebilir ve ziyaret tablosu aracılığıyla istediği besin kaynağını seçebilir. AHA’nın temel aşamalarına bağlı olarak matematiksel model aşağıda verilmiştir [19,28].

➤ Başlangıç

AHA, n besin kaynağına aşağıdaki gibi yerleştirilen n sinekkuşu popülasyonu ile rastgele başlar:

$$x_i = L + r(U - L) \quad i = 1, \dots, n \quad (9)$$

Burada x_i , verilen bir problemin çözümü olan i . besin kaynağının konumunu temsil eder, L ve U , d -boyutlu bir problem için sırasıyla alt ve üst sınırlardır, r , $[0, 1]$ ’de rastgele bir vektördür. Gıda kaynaklarının ziyaret tablosu şu şekilde başlatılır.

$$VT_{i,j} = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ null, & i = j \end{cases} \quad i = 1, \dots, n \quad j = 1, \dots, n \quad (10)$$

Burada $i \neq j$ için, $VT_{i,j} = 0$ j . besin kaynağının mevcut iterasyonda i . sinekkuşu tarafından henüz ziyaret edildiğini gösterir; $i = j$ için $VT_{i,j} = null$ bir sinek kuşunun kendi besin kaynağında yiyecek aldığını gösterir.

➤ Güdümlü yiyecek arama

Üç uçuş becerisinin yardımıyla, mevcut tüm kaynaklardan hedef besin kaynağı seçilir ve bir aday besin kaynağı elde edilir. Güdümlü yiyecek arama davranışını simüle eden matematiksel denklem ve aday bir besin kaynağının elde edilmesi aşağıdaki gibidir:

$$v_i(t+1) = x_{i,target}(t) + b \cdot D(x_i(t) - x_{i,target}(t)), \quad b \sim N(0,1) \quad (11)$$

Burada $x_{i,target}(t)$ hedef gıda kaynağının konumudur, D eksenel, çapraz veya çok yönlü uçuş anlamına gelir, b yönlendirilmiş bir faktördür ve $x_i(t)$ i . gıda kaynağının t anındaki konumudur. i . besin kaynağının konum güncellemesi şu şekilde ifade edilir:

$$x_i(t+1) = \begin{cases} x_i(t), & f(x_i(t)) \leq f(v_i(t+1)) \\ v_i(t+1), & f(x_i(t)) > f(v_i(t+1)) \end{cases} \quad (12)$$

Burada $f(v_i(t+1))$ ve $f(x_i(t))$ sırasıyla $v_i(t+1)$ ve $x_i(t)$ için uygunluk fonksiyonu değeridir.

➤ Bölgesel yiyecek arama

AHA' da bir sinek kuşunun, hedef kaynak ziyaretinden sonra mevcut diğer besin kaynaklarını ziyaret etmek yerine kendi bölgesinde yeni bir besin kaynağı araması mümkündür. Böylece bir sinekkuşu, sömürü sürecini yerel bölgesinde gerçekleştirir. Bölgesel yiyecek arama stratejisinde yerel arama ve bir aday gıda kaynağının türetilmesi aşağıdaki denklemle temsil edilir:

$$v_i(t+1) = x_i(t) + c \cdot D \cdot x_i(t), \quad c \sim N(0,1) \quad (13)$$

Burada c , ortalama = 0 ve standart sapma = 1 olan $N(0,1)$ normal dağılıma bağlı bölgesel bir faktördür.

➤ Göç yiyecek arama

Bir bölgedeki besin kaynakları sıklıkla ziyaret edildiğinde, muhtemelen yiyecek sıkıntısı yaşanır. Bu gibi durumlarda, bir sinek kuşu beslenmek için daha uzak bir besin kaynağına göç etme eğilimindedir. Denklem 14, en kötü nektar doldurma hızına sahip kaynaktan rastgele üretilen yeni bir kaynağına göç eden bir sinek kuşunun göç aramasının matematiksel denklemini vermektedir:

$$x_w(t+1) = L + r(U - L) \quad (14)$$

Burada x_w popülasyondaki en kötü yeniden nektar doldurma oranına sahip besin kaynağını temsil eder, r $[0, 1]$ aralığında rastgele bir vektördür ve L ve U ise sırasıyla alt ve üst sınırlardır.

2.4. Denetleyici tasarımı ve optimizasyon süreci

Çalışma bölgeleri göz önünde bulundurularak hem rüzgârdan maksimum gücü elde etmek (II. Bölge) hem de nominal güçte çalışmasını sağlamak (III. Bölge) amacıyla kanat hatve açısı β 'nin kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla PD, PI ve PID denetleyici yapıları kullanılmış; PD denetleyiciye ait K_P ve K_D parametreleri, PI denetleyiciye ait K_P ve K_I parametreleri ve PID denetleyiciye ait K_P , K_I ve K_D parametreleri optimize edilerek parametre arama uzayı daha iyi keşfedilmeye ve böylece en uygun denetleyici katsayıları elde edilmeye çalışılmıştır. Bu optimizasyon işlemi literatürde oldukça yeni bir metasezgisel optimizasyon algoritması olan AHA ile gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3'te optimize edilmiş PD, PI ve PID denetleyicileriyle rüzgâr türbininin kanat hatve açısı kontrolünü içeren sisteme ait blok diyagram gösterilmektedir. Bahsi geçen denetleyicileri ayarlamak için AHA kullanılırken, nominal çıkış gücü ile ölçülen çıkış gücü arasındaki hata kullanılarak bir uygunluk fonksiyonu hesaplanmaktadır. Ardından, AHA' ya bağlı olarak denetleyici parametreleri değiştirilmektedir.

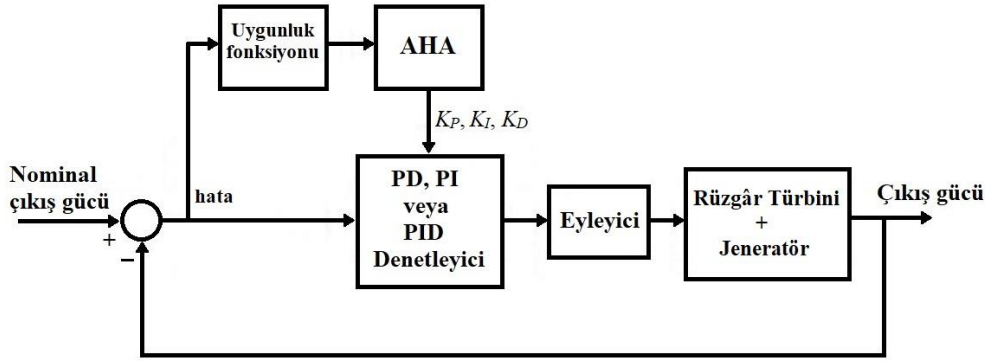
Optimizasyon süreci için uygunluk fonksiyonunun seçimi önemli bir adımdır. Bu çalışmada, nominal çıkış gücü ile ölçülen çıkış gücü arasındaki hatayı temel alarak hem Denklem 15'te tanımlanan integral mutlak hata (integral absolute error-IAE) hem de Denklem 16'da tanımlanan ortalama karesel hata (mean squared error-MSE) uygunluk fonksiyonu olarak kullanılmıştır. Rüzgâr türbini ile ilgili kontrol ve optimizasyon çalışmalarında literatürde kullanılmış ve iyi sonuçlar üretmiş olması, uygunluk fonksiyonu olarak IAE seçilmesinde önemli bir etken olmuştur [8,29,30]. Her ne kadar MSE, rüzgâr türbini ile ilgili kontrol ve optimizasyon çalışmalarında çok sık kullanılsa da benzetim süresi boyunca denetlenen çıkış gücünün nominal çıkış gücüne ne kadar yaklaştığını, ortalama değer etrafında ne şekilde bir dağılım olduğunu görme açısından kullanılması önemlidir.

$$IAE = \int_0^t |e(\tau)| d\tau \quad (15)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (e(k))^2 \quad (16)$$

Optimizasyon sürecinde AHA için seçilen kontrol parametreleri Tablo 2'de verilmiştir. Optimizasyon sonuçlarının güvenilir kabul edilebilmesi için istatistiksel olarak tekdüze bir dağılım göstermesi gerekmektedir. Bu yaklaşımla, literatüre uygun olarak optimizasyon işlemi her bir denetleyici parametresinin optimizasyonunda (PD, PI ve PID)

30 kez tekrarlanmıştır. Her tekrara ait sonuçlar kaydedilmiş ve ilgili uygunluk fonksiyonunun en iyi, en kötü, ortalama ve medyan değerleri ile standart sapmaları hesaplanmıştır.



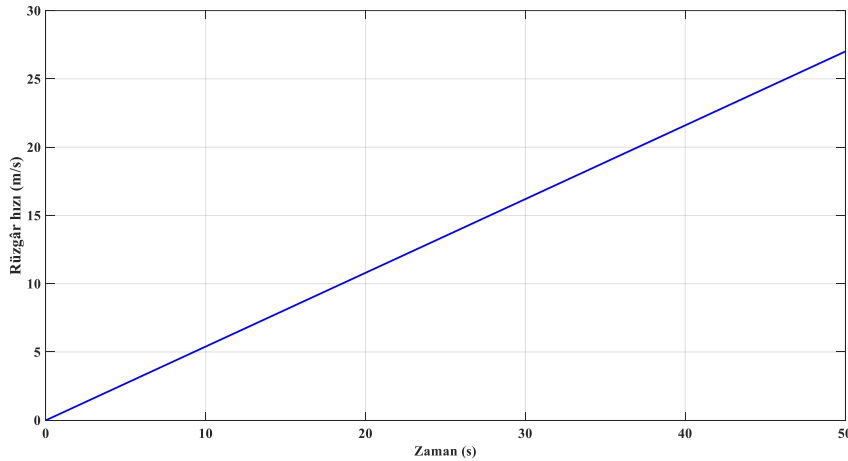
Şekil 3. Kanat hatve açısı kontrolü blok diyagramı.

Tablo 2. AHA ile optimizasyona ait kontrol parametreleri.

Popülasyon sayısı	20
Maksimum iterasyon sayısı	20
Yürütmelerin tekrar sayısı	30
Arama aralıkları	[-10 +10]

3. Bulgular

Optimal kanat hatve açısı kontrolü için Şekil 3'te gösterilen sistem, ilgili eşitlikler kullanılarak Matlab/Simulink ile oluşturulmuştur. AHA ile optimize edilmiş PD denetleyici (AHA-PD), AHA ile optimize edilmiş PI denetleyici (AHA-PI) ve AHA ile optimize edilmiş PID denetleyici (AHA-PID) Şekil 3'te gösterildiği gibi kullanılarak benzetimi gerçekleştirilen rüzgâr türbini sistemi için kanat hatve açısı kontrolünde ayrı ayrı kullanılmış ve performansları incelenmeye çalışılmıştır. Benzetimi gerçekleştirilen rüzgâr türbini sistemine ait parametreler Tablo 3'te listelenmektedir. Bununla birlikte rüzgâr hızı, sistem modeline uygulanan bir rampa fonksiyonu olarak verilmiş ve Şekil 4'te gösterilmiştir.

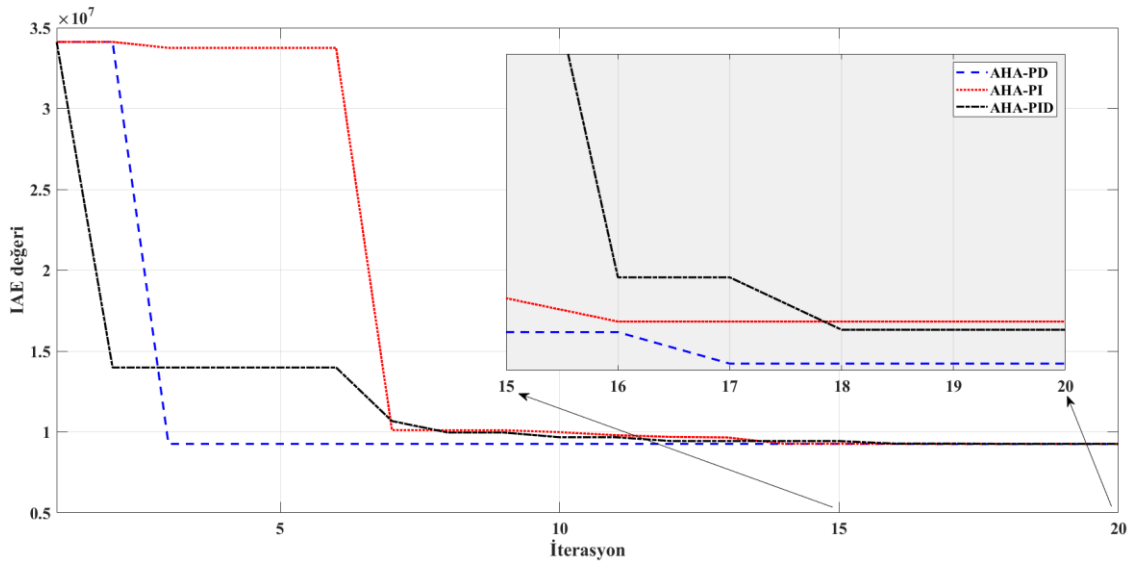


Şekil 4. Rüzgâr hızı-zaman grafiği.

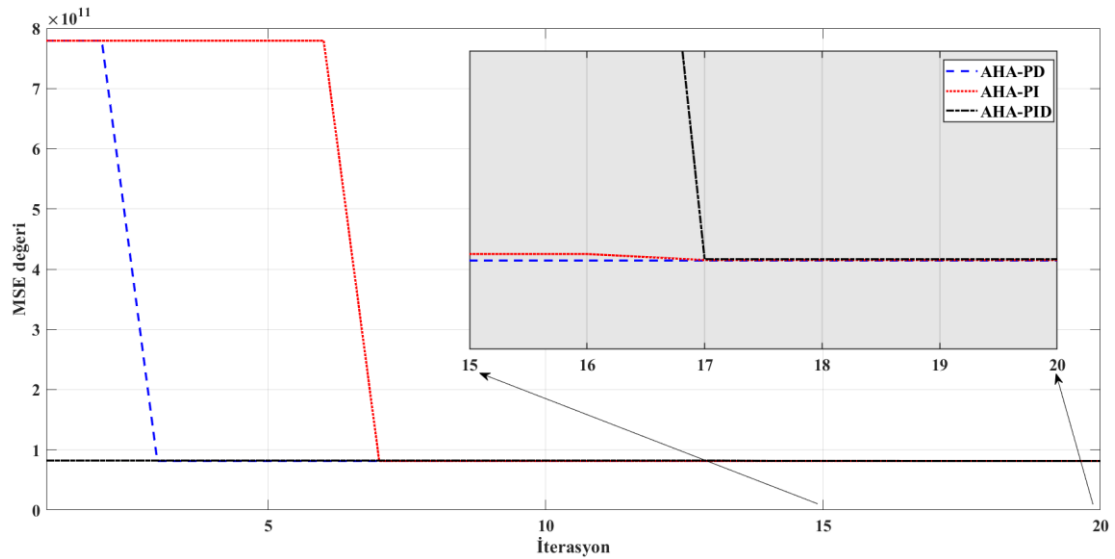
AHA-PD, AHA-PI ve AHA-PID denetleyicilerine ait IAE ve MSE kriterleri bazında optimizasyonlar sonucunda elde edilen yakınsama grafikleri Şekil 5 ve Şekil 6'da sırasıyla verilmiştir. Ayrıca, 30 bağımsız yürütme ile optimize edilmiş her üç denetleyiciye ait elde edilen en iyi, en kötü ve ortalama uygunluk fonksiyonu değerleri ile standart sapmaları ve denetleyici parametreleri ise Tablo 4'te sunulmaktadır. Şekil 5'ten ve Tablo 4'ten her üç denetleyici içerisinde AHA-PD'nin 20 iterasyon boyunca en düşük IAE değerine ulaştığı açıkça görülmektedir. Öte yandan, verilerin veri setine yakınlığını standart sapma ile açıklamaktadır. Standart sapmanın küçük olması ilgili denetleyicinin optimizasyon sürecindeki kararlılığını göstermektedir. AHA-PID'nin en düşük standart sapma değeri 0.1727×10^6 ile 30 bağımsız yürütme süresince daha gürbüz ve güvenilir olduğu söylenebilir. Uygunluk fonksiyonu olarak MSE seçildiğinde ise her üç denetleyici de en iyi MSE değeri açısından birbirine yakın sonuçlar üretmiştir. Bu durum hem Şekil 6'da hem de Tablo 4'te gösterilmiştir. Bununla birlikte standart sapmanın en düşük değeri 3.5490×10^8 ile AHA-PID denetleyicisi için elde edilmiştir. Uygunluk fonksiyonu olarak MSE seçildiğinde, AHA-PID 30 bağımsız yürütme süresince birbirine daha yakın sonuçlar üretmiştir ve daha gürbüzdür.

Tablo 3. Benzetimi gerçekleştirilen rüzgâr türbini sistemine ait parametreler [6,31].

Parametre	Değer
Nominal çıkış gücü	500 kW
Çalışma modu	Şebekeye bağlı
Devreye girme rüzgâr hızı	3 m/s
Nominal rüzgâr hızı	12 m/s
Devreden çıkma rüzgâr hızı	25 m/s
Rotor çapı	48 m
Süpürme alanı	1810 m ²
Kanat sayısı	3
Nominal rotor hızı	30 rpm
Rotor hız aralığı	10-30 rpm
Dişli kutusu oranı	1:50
Jeneratör adedi	2
Jeneratör tipi	Asenkron sincap kafes
Jeneratör nominal çıkış	250 kW
Jeneratör nominal devir	1500 rpm
Jeneratör gerilimi	690 V



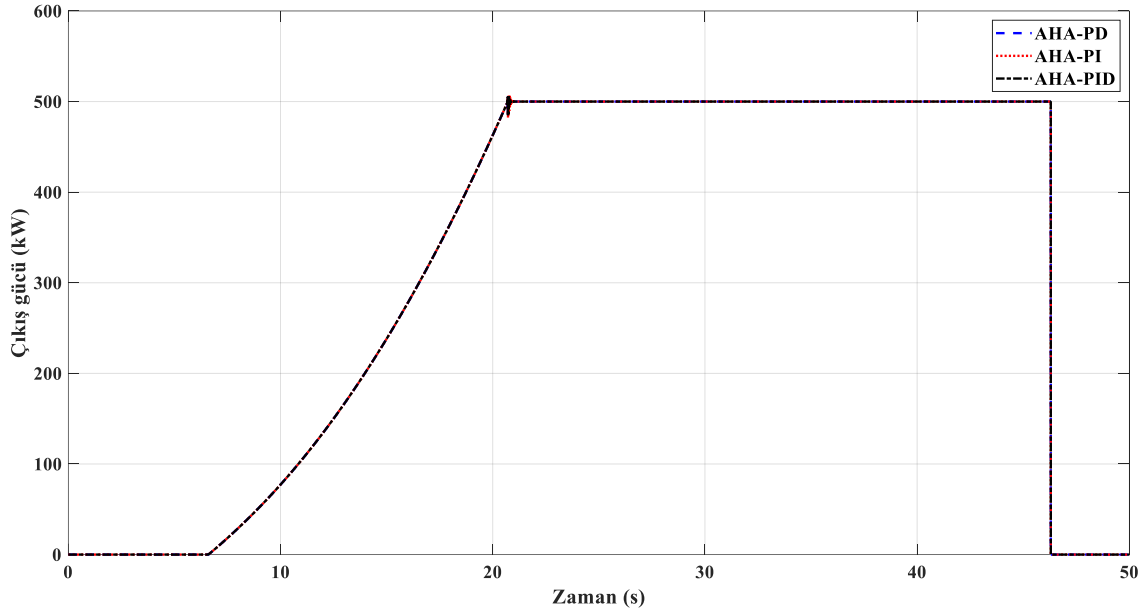
Şekil 5. IAE için AHA ile optimizasyon sonucunda elde edilen yakınsama grafikleri.



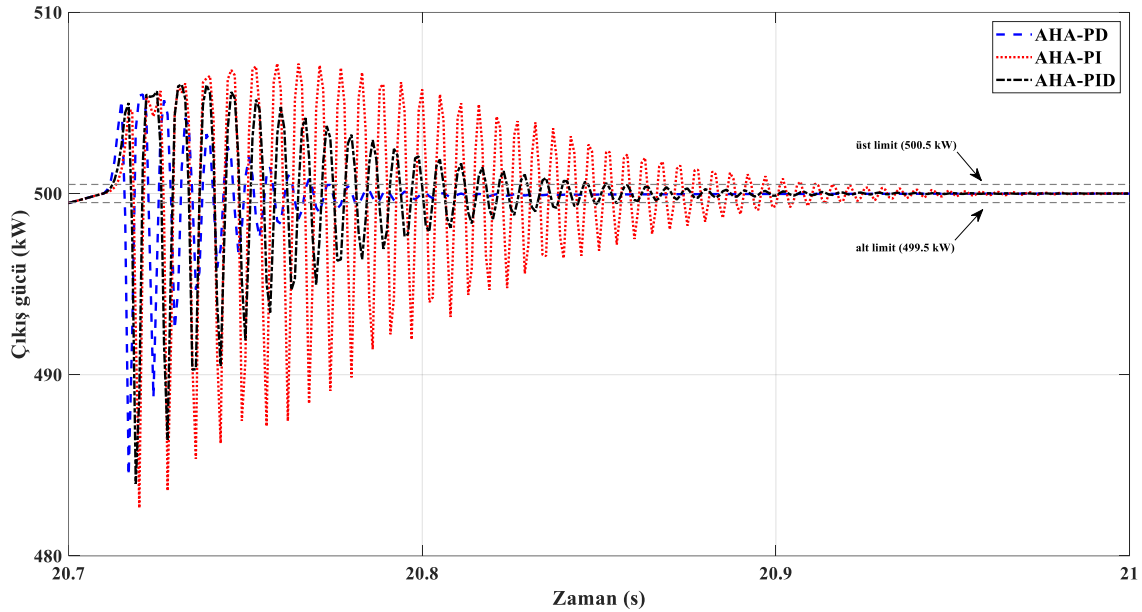
Şekil 6. MSE için AHA ile optimizasyon sonucunda elde edilen yakınsama grafikleri.

IAE uygunluk fonksiyonu kullanılarak optimize edilen her üç denetleyiciye ait benzetim sonuçlarına bu kısımda yer verilmiştir. Şekil 7'de zamana göre sistemin çıkış gücü eğrileri gösterilmektedir. Şekil 8'de ise bu eğrilerin 20.7-21 saniye aralığında yakınlaştırılmış hali gösterilmektedir. Böylece her üç denetleyici varlığında sistemlerin

göstermiş olduğu geçiş cevaplarının daha net gösterilmesi ve kararlı hal cevabına geçişteki performanslarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Her üç denetleyici yapısı ile de sistem nominal rüzgâr hızına ulaştığında nominal güç olan 500 kW seviyelerine erişmiş fakat geçiş cevabında milisaniyeler mertebesinde osilasyonlar gerçekleşmiştir. Sistemin kararlı hal hatası için %0.1 hata referans olarak kabul edilmiş ve böylece 500.5 kW üst limit, 499.5 kW ise alt limit olarak belirlenmiştir. Şekil 8'den de görülmektedir ki, sistem kararlı hal cevabına sırasıyla AHA-PD ile 0.063 saniyede, AHA-PI ile 0.206 saniyede, AHA-PID ile 0.145 saniyede ulaşmaktadır. Her üç denetleyici yapısı ile de sistemin nominal güce hızlı bir şekilde ulaşmaktadır. Fakat AHA-PD ile sistemin kararlı hal cevabına daha çabuk eriştiği, osilasyonların daha hızlı bastırıldığı açıkça görülmektedir. Bunun yanında sistemde oluşan maksimum aşma AHA-PD ile %1.09, AHA-PI ile %1.43 ve AHA-PID ile %1.20 olarak gerçekleşmiştir. Sonuç olarak her üç denetleyici yapısı ile de maksimum aşmanın makul düzeyde tutulduğu, uygunluk fonksiyonu olarak IAE seçildiğinde AHA-PD'nin daha başarılı bir sonuç ürettiği söylenebilir.



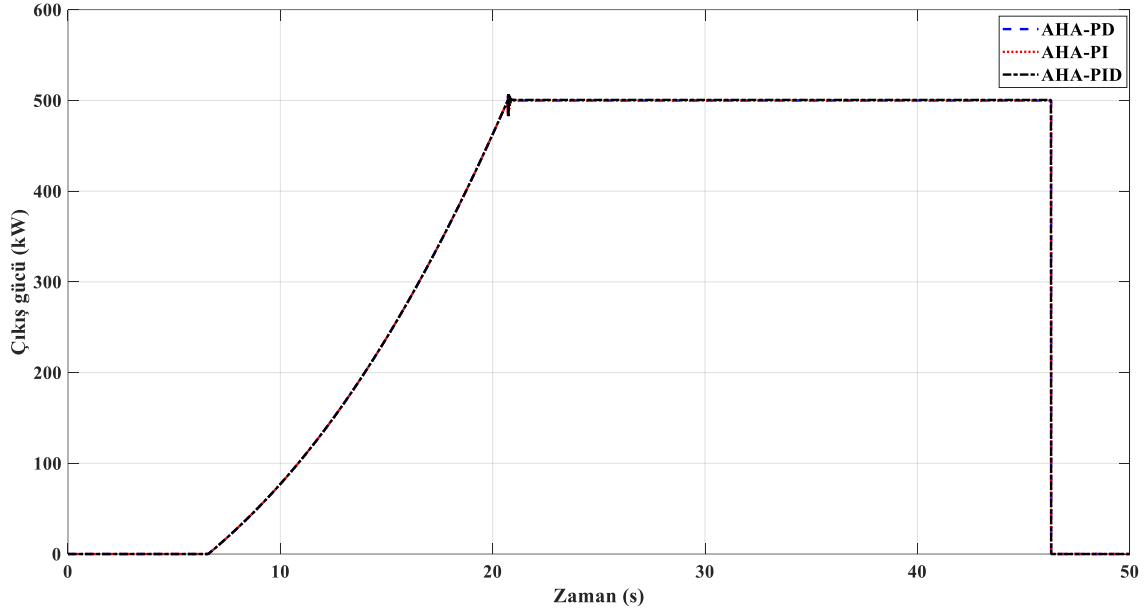
Şekil 7. Her üç denetleyiciye ait sistemin çıkış gücü-zaman eğrileri grafiği (IAE kullanımında).



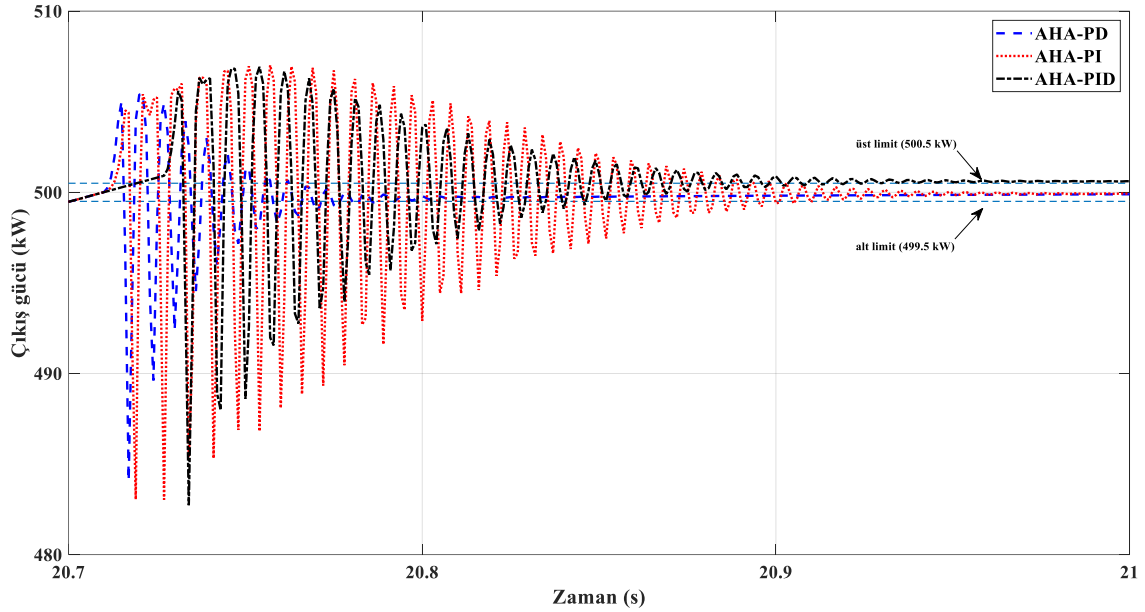
Şekil 8. Çıkış gücü-zaman eğrilerinin geçiş cevabında yakınlaştırılmış grafikleri (IAE kullanımında).

MSE uygunluk fonksiyonu kullanılarak optimize edilen denetleyicilerin benzetim sonuçlarına ise bu kısımda yer verilmiştir. Sistemin zamana göre çıkış gücü eğrileri Şekil 9'da verilmektedir. Şekil 10'da ise yine bu eğrilerin 20.7-21 saniye aralığında yakınlaştırılmış hali gösterilmektedir. Kararlı hal hatası için %0.1 hata referans kabul edildiğinde sistem kararlı hal cevabına AHA-PD ile 0.077 saniyede, AHA-PI ile de 0.201 saniyede erişmektedir. Bununla birlikte Şekil 10'da da gösterildiği üzere AHA-PID ile sistemin hata referansının üst sınırı olan 500.5 kW civarında salınımlarına devam ettiği ve sistemin nihai cevabında kararlı hal hatası olduğu gözlemlenmiştir. Sistemde oluşan maksimum aşma ise sırasıyla AHA-PD ile %1.08, AHA-PI ile %1.40 ve AHA-PID ile %1.38 olarak

gerçekleşmiştir. Uygunluk fonksiyonu olarak MSE seçilmesiyle optimize edilen denetleyiciler arasından AHA-PD'nin hem elde edilen maksimum aşma değerleri hem de geçiş cevapları açısından AHA-PI ve AHA-PID'ye göre daha başarılı olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 9. Her üç denetleyiciye ait sistemin çıkış gücü-zaman eğrileri grafiği (MSE kullanımında).



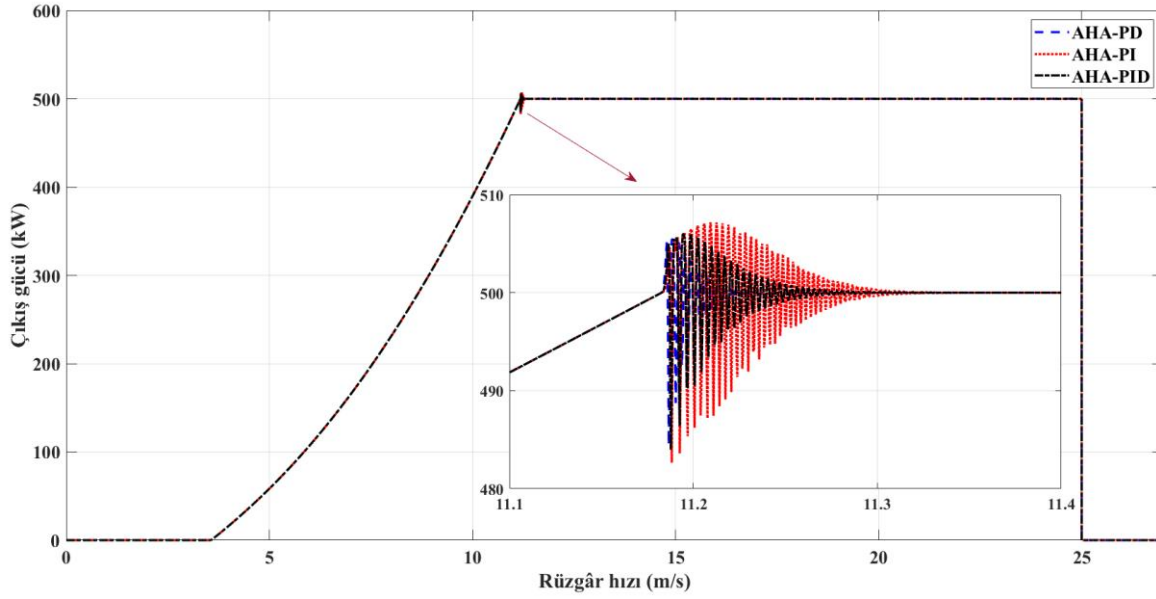
Şekil 10. Çıkış gücü-zaman eğrilerinin geçiş cevabında yakınlaştırılmış grafikleri (MSE kullanımında)

Tablo 4. Elde edilen uygunluk fonksiyonu değerleri ve denetleyici parametreleri.

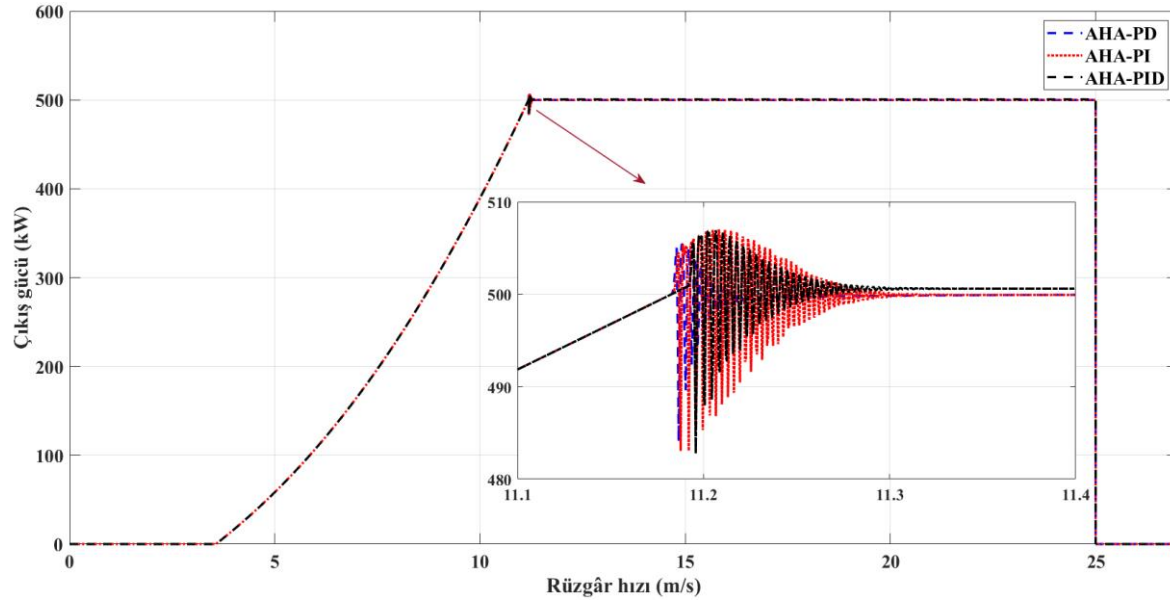
	IAE değerleri				Elde edilen denetleyici parametreleri		
	En İyi	En Kötü	Ortalama	Standart Sapma	K_P	K_I	K_D
AHA-PD	9.2621×10^6	34.1220×10^6	13.4254×10^6	9.4147×10^6	-1.499358		-0.080500
AHA-PI	9.2627×10^6	34.1220×10^6	17.7681×10^6	11.7699×10^6	-8.968615	0.000003	
AHA-PID	9.2624×10^6	9.8518×10^6	9.5065×10^6	0.1727×10^6	-4.280695	0.000001	-0.027245
	MSE değerleri				Elde edilen denetleyici parametreleri		
	En İyi	En Kötü	Ortalama	Standart Sapma	K_P	K_I	K_D
AHA-PD	8.1465×10^{10}	7.7936×10^{11}	1.5131×10^{11}	2.1293×10^{11}	-0.509519		-0.090396
AHA-PI	8.1465×10^{10}	7.7936×10^{11}	2.9107×10^{11}	3.2513×10^{11}	-9.247371	0.000092	
AHA-PID	8.1465×10^{10}	8.3120×10^{10}	8.1674×10^{10}	3.5490×10^8	-4.545807	-0.000371	-0.024764

Şekil 11 ve Şekil 12'de sırasıyla IAE ve MSE kriterleri seçilerek optimize edilen denetleyiciler için rüzgâr hızının değişimine göre çıkış gücü eğrileri gösterilmektedir. Her iki şekilden de görüldüğü gibi AHA-PD ile rüzgâr hızı değişimine göre kanat hatve açısı daha hızlı bir şekilde olması gereken değeri takip etmekte ve böylece sistem

nominal güce daha çabuk oturmaktadır. Denetleyicilerin optimizasyon sürecinde uygunluk fonksiyonu olarak IAE ya da MSE seçilmesi, kanat hatve açısını kontrol ederek nominal güç takibini gerçekleştirme işlevi açısından dikkate değer bir farklılık oluşturmamaktadır.



Şekil 11. Her üç denetleyiciye ait sistemin çıkış gücü-rüzgâr hızı eğrileri (IAE kullanımında).



Şekil 12. Her üç denetleyiciye ait sistemin çıkış gücü-rüzgâr hızı eğrileri (MSE kullanımında).

4. Tartışma ve Sonuç

Rüzgâr türbinlerinde üretilen gücün kontrol edilmesi açısından kanat hatve açısının ayarlanması önemli bir mekanizmadır. Bu çalışmada kanat hatve açısının ayarlanması amacıyla PD, PI ve PID denetleyici yapıları önerilmiştir. Bu denetleyicilere ait parametreler literatürde oldukça yeni bir algoritma olan AHA ile optimize edilmiştir. Sonuçların güvenilirliği açısından optimizasyon işlemi 30 kez tekrarlanmış ve bu tekrarlara ait veriler kaydedilmiştir. Bahsi geçen denetleyiciler arasında optimizasyon süreci açısından AHA-PID'nin daha gürbüz ve güvenilir olduğu, 30 kez tekrarlanan optimizasyon süresince birbirine daha yakın sonuçlar ürettiği açıktır. En düşük standart sapma değerinin sırasıyla IAE uygunluk fonksiyonu için 0.1727×10^6 ve MSE uygunluk fonksiyonu için 3.5490×10^8 olarak AHA-PID ile elde edilmesi bu durumu desteklemektedir. Öte yandan her iki uygunluk fonksiyonunun en iyi değerleri göz önünde bulundurulduğunda ise AHA-PD denetleyici IAE kriteri baz alınarak gerçekleştirilen optimizasyon sonucunda daha başarılı sonuçlar üretmiş, MSE kriteri baz alınarak gerçekleştirilen optimizasyon sonucunda ise üç denetleyici arasında bir fark görülmemiştir. Sistem %0.1'lik yerleşme süresine, IAE kriteri baz alınarak optimize edilmiş AHA-PD ile 0.063 saniyede, MSE kriteri baz alınarak optimize edilmiş AHA-PD ile 0.077 saniyede ulaşmıştır. Benzer şekilde sistemin geçiş cevabındaki maksimum aşma IAE kriteri baz

alınarak optimize edilmiş AHA-PD ile %1.09, MSE kriteri baz alınarak optimize edilmiş AHA-PD ile %1.08 olarak gerçekleşmiştir. Kullanılan üç denetleyici arasından hem en düşük maksimum aşma değerlerine hem de en kısa yerleşme sürelerine sahip olması AHA-PD'nin diğer iki denetleyiciden daha başarılı olduğunu göstermektedir.

IAE ve MSE kriterleri baz alınarak 30 kez bağımsız yürütülen optimizasyon sürecinde elde edilen standart sapma değerlerine göre AHA-PD ve AHA-PI denetleyicilerden daha başarılı sonuçlar veren AHA-PID denetleyici, kanat hatve açısının kontrolünde aynı başarıyı gösterememiştir. AHA-PI ve AHA-PID denetleyici yapılarının integral kazançlarından dolayı az da olsa aşma miktarında artışa ve yerleşme süresinde gecikmeye sebep olduğu açıktır. Hem Tablo 1'de performans kriterleri açısından verilen bilgiler hem de literatürdeki PD denetleyicinin kullanıldığı birçok çalışmada daha kararlı ve geçiş cevabı açısından daha başarılı sonuçlar üretmiş olması [32-36], bu çalışmada elde edilen bulguları destekler niteliktedir. Benzetim çalışmalarına ait bulgular ışığında daha başarılı sonuçlar üreten AHA-PD'nin bulanık mantık denetleyici, kesir dereceli denetleyici gibi tekniklerle birleştirilip geliştirilmesi ve mikrodenetleyici yapıları üzerinde hayata geçirilmesi gelecekte yapılması planlanan çalışmalar arasındadır.

Kaynakça

- [1] Gültekin, U. 2019. Türkiye'de Rüzgâr Enerjisi Yatırımlarının Gelişimi. *Turkish Studies (Elektronik)*, 14(4), 2333-2348.
- [2] Şenel, M. C., Koç, E. 2015. Dünyada ve Türkiye'de rüzgâr enerjisi durumu-Genel değerlendirme. *Mühendis ve Makina*, 56(663), 46-56.
- [3] Koç, E., Güven, A. N. 2011. Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinlerinin Modellenmesi ve Arıza Sonrası Sisteme Katkı Yeteneklerinin İncelenmesi/Modeling and Investigation of Fault Ride Through Capability of Variable Speed Wind Turbines. *EMO Bilimsel Dergi*, 1(1), 51-55.
- [4] Hwas, A., Katebi, R. 2012. Wind turbine control using PI pitch angle controller. *IFAC Proceedings Volumes*, 45(3), 241-246.
- [5] Lüy, M., Civelek, Z., Çam, E. 2017. Kalıcı miknatıslı senkron jeneratörlü rüzgâr türbinlerinde bireysel hatve açısı kontrolü ile çıkış gücü kararlılığı ve mekanik yüklerin azaltılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(5), 504-511.
- [6] Civelek, Z., Lüy, M., Çam, E., Barışçı, N. 2016. Control of pitch angle of wind turbine by fuzzy PID controller. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 22(3), 463-471.
- [7] Karthik, R., Hari, A. S., Kumar, Y. P., Pradeep, D. J. 2020. Modelling and control design for variable speed wind turbine energy system. *International Conference on Artificial Intelligence and Signal Processing (AISP)*, January 10-12, Amaravati, India.
- [8] Sougueh, I. M., Görel, G. 2022. PI, PID ve GA-PID Kontrolör ile Rüzgâr Türbinin Kanat Hatve Açısı Kontrolü. *International Journal of Engineering Research and Development*, 14(2), 502-513.
- [9] Habibi, H., Nohooji, H. R., Howard, I. 2018. Adaptive PID control of wind turbines for power regulation with unknown control direction and actuator faults. *IEEE Access*, 6, 37464-37479.
- [10] Han, B., Zhou, L., Yang, F., Xiang, Z. 2016. Individual pitch controller based on fuzzy logic control for wind turbine load mitigation. *IET Renewable power generation*, 10(5), 687-693.
- [11] Van, T. L., Nguyen, T. H., Lee, D.-C. 2015. Advanced pitch angle control based on fuzzy logic for variable-speed wind turbine systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 30(2), 578-587.
- [12] Naik, K. A., Gupta, C. P., Fernandez, E. 2020. Design and implementation of interval type-2 fuzzy logic-PI based adaptive controller for DFIG based wind energy system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 115, 105468.
- [13] Jeon, T., Paek, I. 2021. Design and verification of the LQR controller based on fuzzy logic for large wind turbine. *Energies*, 14(1), 230.
- [14] Pehlivan, A. S., Bahceci, B., Erbatur, K. 2022. Genetically optimized pitch angle controller of a wind turbine with fuzzy logic design approach. *Energies*, 15(18), 6705.
- [15] Zheng, S.-G., Chang, C.-K., Pan, J.-S. 2020. Double fuzzy pitch controller of wind turbine designed by genetic algorithm. *International Automatic Control Conference (CACCS)*, November 4-7, Taiwan.
- [16] Chouket, M., Abdelkafi, A., Krichen, L. 2018. Wind Turbine PI Controller's Optimization Using PSO Algorithm. *15th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, March 19-22, Tunisia.

- [17] Poultangari, I., Shahnazi, R., Sheikhan, M. 2012. RBF neural network based PI pitch controller for a class of 5-MW wind turbines using particle swarm optimization algorithm. *ISA Transactions*, 51(5), 641-648.
- [18] Navarrete, E. C., Perea, M. T., Correa, J. J., Serrano, R. C., Moreno, G. R. 2019. Expert control systems implemented in a pitch control of wind turbine: A review. *IEEE Access*, 7, 13241-13259.
- [19] Çelik, M., Soylu, S. 2023. Parameter estimation study of polymer electrolyte membrane fuel cell using artificial hummingbird algorithm. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 237(8), 1956-1967.
- [20] Dirik, M. 2022. Comparison of Recent Meta-Heuristic Optimization Algorithms Using Different Benchmark Functions. *Journal of Mathematical Sciences and Modelling*, 5(3), 113-124.
- [21] Hussain, K., Salleh, M. N. M., Cheng, S., Naseem, R. 2017. Common benchmark functions for metaheuristic evaluation: A review. *International Journal on Informatics Visualization*, 1(4-2), 218-223.
- [22] Ghasemi, S., Tabesh, A., Askari-Marnani, J. 2014. Application of fractional calculus theory to robust controller design for wind turbine generators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 29(3), 780-787.
- [23] Garcia-Sanz, M., Houpis, C. H. 2012. *Wind Energy Systems: Control Engineering Design*. Taylor & Francis Group CRC press. Boca Raton, Florida, USA, 613s.
- [24] Janssens, O., Noppe, N., Devriendt, C., Van de Walle, R., Van Hoecke, S. 2016. Data-driven multivariate power curve modeling of offshore wind turbines. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 55, 331-338.
- [25] Xiao, Z., Zhao, Q., Yang, X., Zhu, A. 2020. A power performance online assessment method of a wind turbine based on the probabilistic area metric. *Applied Sciences*, 10(9), 3268.
- [26] Ogata, K. 2010. *Modern Control Engineering*. 5th edition. Prentice Hall. New Jersey, USA, 912s.
- [27] Ang, K. H., Chong, G., Li, Y. 2005. PID Control System Analysis, Design, and Technology. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 13(4), 559-576.
- [28] Zhao, W., Wang, L., Mirjalili, S. 2022. Artificial hummingbird algorithm: A new bio-inspired optimizer with its engineering applications. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 388, 114194.
- [29] Frikh, M. L., Soltani, F., Bensiali, N., Boutasseta, N., Fergani, N. 2021. Fractional order PID controller design for wind turbine systems using analytical and computational tuning approaches. *Computers and Electrical Engineering*, 95, 107410.
- [30] Maroufi, O., Choucha, A., Chaib, L. 2020. Hybrid fractional fuzzy PID design for MPPT-pitch control of wind turbine-based bat algorithm. *Electrical Engineering*, 102(4), 2149-2160.
- [31] Civelek, Z. 2013. Bulanık PID kontrolör ile rüzgâr türbininin hatve açısının kontrolü. *Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi*, 134s, Kırıkkale.
- [32] Borase, R. P., Maghade, D., Sondkar, S., Pawar, S. 2021. A review of PID control, tuning methods and applications. *International Journal of Dynamics and Control*, 9, 818-827.
- [33] Castillo-Zamora, J. J., Camarillo-Gomez, K. A., Perez-Soto, G. I., Rodriguez-Resendiz, J. 2018. Comparison of PD, PID and sliding-mode position controllers for V-tail quadcopter stability. *IEEE Access*, 6, 38086-38096.
- [34] Oku, D. E., Obot, E. P. 2018. Comparative study of PD, PI And PID controllers for control of a single joint system in robots. *International Journal of Engineering and Science*, 7(6), 51-54.
- [35] Song, Y.-D. 2018. *Control of nonlinear systems via PI, PD and PID: Stability and performance*. Taylor & Francis Group CRC press. Boca Raton, Florida, USA, 152s.
- [36] Zhou, F., Liu, J. 2018. Pitch controller design of wind turbine based on nonlinear PI/PD control. *Shock and Vibration*, 2018, 1-14.

Kapalı Formda Temsil Edilen Cebirsel Düzlem Eğrilerinin İzometrilere ve Simetrilerinin Hesaplanması

Hüsnu Anıl Çoban^{*1}, Uğur Gözütok¹

^{*1} Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Fakültesi, Matematik Bölümü, Trabzon

(Alınış / Received: 02.07.2023, Kabul / Accepted: 31.08.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 31.08.2023)

Anahtar Kelimeler
Cebirsel eğriler,
İzometrilere,
Simetriler

Öz: Bu çalışmada, kapalı formda temsil edilen cebirsel düzlem eğrilerinin izometrilere ve simetrilerinin hesaplanması için yeni bir algoritma sunulmaktadır. Bu hesaplamalarda kullanılacak metod iki kısımdan oluşmaktadır. Metodun birinci kısmı, problemi, orijini sabitleyen izometrilere indirgerken, diğer kısımda eğrilerin denk olmasını sağlayan izometrilere tespiti yapılmaktadır. Girdi eğrilerinin özdeş olması durumunda metod, kapalı formda temsil edilen bir cebirsel düzlem eğrisinin tüm simetrilerini tespit etmektedir. Metodun etkinliğine kanıt oluşturacak testler yürütülmesi için, oluşturulan algoritma, Maple bilgisayar cebir sistemi kullanılarak implement edilmiştir.

Computing Isometries and Symmetries of Implicit Plane Algebraic Curves

Keywords
Algebraic curves,
Isometries,
Symmetries

Abstract: In this study, we present a new algorithm to compute the isometries and symmetries of implicit plane algebraic curves. The method to be used for this computing consists of two parts. The first part of the method reduces the problem to isometries fixing the origin, while the other part determines the isometries between the curves. If the input curves are identical, the method detects all the symmetries of an implicit plane algebraic curve. We have implemented the algorithm in the computer algebra system Maple to run tests providing evidence of the efficiency of the method.

*Corresponding Author, email: hacoban@ktu.edu.tr

1. Giriş

Geometrik nesnelere bazı geometrilerdeki denklikleri ve simetrilerinin tespiti, örüntü tanıma, bilgisayar grafikleri, bilgisayarlı görü ve bilgisayar destekli geometrik tasarım gibi alanlarda temel problemlerin çözümüne olan katkısından dolayı oldukça önem arz etmektedir. Bahsi geçen alanlarda verilen depolanması, karşılaştırılması, eksik verilerin tamamlanması gibi birçok işlem için eğri ile modellenmiş her bir nesnenin şeklini, konumunu ve perspektifini anlamak için bu eğrilerin denklik ve simetrilerinin tespiti, süreci kolaylaştırmaktadır. Bu doğrultuda hazırlanmış, düzlem kapalı eğrileri kullanarak veri aktarımını ve şekil tanımayı kolay, hızlı ve bellek yükünü hafifletici hale getirmeyi amaçlayan [16,17] tez çalışmaları da probleme mühendislik alanında nasıl yaklaşıldığına dair özel örnekler olarak verilebilir.

Günümüzde, özellikle cebirsel eğri ve yüzeylerin denkliklerinin tespiti yoğun bir şekilde çalışılmaktadır. Bu çalışmalar cebirsel eğrilerin temsillerine göre ikiye ayrılmaktadır. Bunlardan ilki rasyonel bir parametrisasyonla temsil edilen rasyonel eğrilerdir. İkincisi ise kapalı bir polinom denklemi ile temsil edilen kapalı formdaki eğrilerdir. [1,4,9,13] çalışmalarında, rasyonel cebirsel eğrilerin çeşitli boyutlarda ve geometrilerdeki denklik ve simetrilerinin tespiti üzerine yaklaşımlar sunulmaktadır. Rasyonel eğrilere göre daha az çalışılmış olan kapalı formda temsil edilen cebirsel eğriler için geliştirilen yaklaşımlar ise [2,6,7,9] çalışmalarında bulunmaktadır.

Rasyonel yüzeyler için ise [5,11,12] çalışmalarında, oluşturulan yöntemler tartışılırken, kapalı formda temsil edilen yüzeyler için [8,9] çalışmaları haricinde birçok denklik problemi henüz çözülememiştir.

Bu çalışmada, yukarıda bahsedilen çalışmalarda olduğu gibi, kapalı formda temsil edilen iki cebirsel düzlem eğrisi arasındaki Öklid anlamında denkliklerin yani izometrilere hesaplanması amaçlanmıştır. İzometrilere, üzerinde tanımlı oldukları uzayların metrik yapılarını koruyan dönüşümlerdir [10]. Eğer iki cebirsel düzlem eğrisi arasında, birini diğerine dönüştüren bir izometri varsa, bu iki eğriye *izometrik* denir. Diğer yandan, bir cebirsel düzlem eğrisini invariant (değişmez) bırakan, birim dönüşümden farklı bir izometri varsa, bu eğriye *simetrik* denir. Kapalı formda temsil edilen cebirsel düzlem eğrilerinin doğrudan izometri ve simetrilerinin tespiti üzerine literatürde yalnızca iki çalışma bulunmaktadır [2,3]. Bu çalışmaların birinde karmaşık temsil, diğerinde ise harmonik polinomlar kullanılarak hesaplamalı bir yöntem oluşturulmuştur. Ancak, hesaplamalı alanlarda, problemin tam çözümünün ortaya konulmasının yanında, verilen metodun basit ve çözüme hızlı bir biçimde ulaşması da çok önemlidir. Bu anlamda, yeni metodların ortaya çıkması ve eski metotlardan daha iyi performans koyabilmesi önem arz etmektedir. Bu çalışmada da oldukça basit ve hızlı bir metod geliştirilmesi hedeflenmektedir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Ön Bilgiler

Bu kısımda, problemin çözümü için gerekli ön bilgiler ve problemin açık ifadesi verilecektir. Aşağıdaki polinom denkleminin çözüm kümesinden meydana gelen bir cebirsel eğriye, kapalı formda temsil edilen n dereceli bir cebirsel düzlem eğrisi adı verilir:

$$f(x, y) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-j} a_{ij} x^i y^j = 0 \quad (1)$$

Genel olarak, x ve y deki toplam $\leq n$ dereceli tüm terimler bu denklemde görülür. Bu tür cebirsel eğrileri C sembolü ile göstereceğiz. Başka bir deyişle, C cebirsel eğrisinin derecesi, eğriyi temsil eden $f(x, y)$ polinomunun derecesi ile tanımlanır. Bu çalışmada ele alacağımız eğrilerin derecesi, aksi iddia edilmedikçe, $n \geq 3$ olarak kabul edilecektir. Çünkü $n = 1$ için C eğrisi trivial durum olan doğru durumuna indirgenecektir. Yine $n = 2$ için konik kesitler durumu elde edilir ki konik kesitler literatürde iyi çalışılmış geometrik objelerdir. Ayrıca, çalışma boyunca C eğrisi üzerinde aşağıdaki varsayımlar kabul edilecektir:

- i. C eğrisini temsil eden $f(x, y)$ polinomu indirgenemez bir polinomdur.
- ii. C eğrisi bir çember ya da doğru değildir.

Yukarıdaki ilk kabulün sebebi, denklik ve simetri tanımlarının temsil polinomuna indirgenmesi için yapılan teknik bir kabuldür. Benzer şekilde ikinci kabulün sebebi ise bu durumların trivial durumlar olmasıdır.

$\mathbf{x} = (x, y)^T$, Q matrisi 2×2 tipinde bir ortogonal matris, yani $QQ^T = I$ ve $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^2$ olmak üzere, düzlemde bir izometri $\mathcal{T}(\mathbf{x}) = Q\mathbf{x} + \mathbf{b}$ şeklinde tanımlanır. C_1, C_2 cebirsel düzlem eğrileri için, $\mathcal{T}(C_1) = C_2$ olacak şekilde bir \mathcal{T} izometrisi varsa, C_1 ve C_2 eğrilerine izometrik denir. C cebirsel düzlem eğrisi için, $\mathcal{T}(C) = C$ olacak şekilde birim dönüşümden farklı bir \mathcal{T} izometrisi varsa, C eğrisine simetrik denir. C_1 ve C_2 eğrileri sırasıyla $f(x, y)$ ve $g(x, y)$ polinomları ile temsil edilmek üzere, (i) kabulünden dolayı, eğer C_1 ve C_2 eğrileri izometrik ise, bu takdirde bir $\lambda > 0$ sabiti için aşağıdaki eşitlik geçerlidir:

$$f(\mathcal{T}(\mathbf{x})) = \lambda g(\mathbf{x}) \quad (2)$$

Diğer yandan, eğer $f(x, y)$ polinomu ile temsil edilen C eğrisi simetrik ise bu takdirde, aşağıdaki eşitlik gerçekleşir:

$$f(\mathcal{T}(\mathbf{x})) = \lambda f(\mathbf{x}) \quad (3)$$

İzometrilere dereceyi korudukları için izometrik C_1 ve C_2 eğrilerinin dereceleri aynı olmalıdır. Bu yüzden makalenin geri kalan kısmında C_1 ve C_2 eğrilerinin dereceleri aynı $n \geq 3$ olarak kabul edilecektir.

Diğer yandan, metodun dayandırılacağı en önemli özelliklerden bir tanesi de homojen formlar kavramıdır. Derecesi n olan keyfi bir $f(x, y)$ polinomu, homojen polinomların toplamı şeklinde yazılabilir. Bu durum

$$f(x, y) = f_n(x, y) + f_{n-1}(x, y) + \dots + f_0(x, y) \quad (4)$$

ile ifade edilebilir. Burada, $0 \leq d \leq n$ olmak üzere, $f_d(x, y)$ polinomu, derecesi d olan bir homojen polinomdur. Bu durumu aşağıdaki örneklerle açıklayalım.

2.1.1. Örnek. $f(x, y) = x^7 + x^2y^5 - 2x^6y + 5x^3y^2 - 4x^2y^3 + 3y^5 + x^3 - y^3 + 2y^2 - 6$ polinomu verilsin. f polinomunun (4) yazılımındaki homojen formları

$$\begin{aligned} f_7(x, y) &= x^7 + x^2y^5 - 2x^6y \\ f_6(x, y) &= 0 \\ f_5(x, y) &= 5x^3y^2 - 4x^2y^3 + 3y^5 \\ f_4(x, y) &= 0 \\ f_3(x, y) &= x^3 - y^3 \\ f_2(x, y) &= 2y^2 \\ f_1(x, y) &= 0 \\ f_0(x, y) &= -6 \end{aligned} \quad (5)$$

şekindedir.

Böylece, bu çalışmaya motivasyon oluşturan problem aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

Problem: Sırasıyla, indirgenemez $f(x, y)$ ve $g(x, y)$ polinom temsilleriyle verilen, çember ve doğrudan farklı, birden çok bileşeni bulunmayan, aynı $n \geq 3$ derecesine sahip C_1 ve C_2 cebirsel düzlem eğrileri için, bu eğrilerin izometrik olup olmadığını, eğer izometrik iseler aralarındaki olası tüm izometrilere tespit eden bir algoritmanın oluşturulmasıdır.

2.2. Metot ve Strateji

Bu kısımda, bir önceki kısımda belirtilen problem için bir metot inşa edilecektir. Metodun basamakları aşağıdaki düzeni takip edecektir:

1. *Problemin indirgenmesi:* Bu basamakta, problem orijini sabitleyen izometrilere indirgenecektir. Q matrisi 2×2 tipinde ortogonal bir matris olmak üzere, orijini sabitleyen bir izometri $\mathcal{T}(\mathbf{x}) = Q\mathbf{x}$ şeklindedir. Bu tipte izometrilere için kolayca görülebilir ki (2) denklemi, $1 \leq d \leq n$ olmak üzere $f_d(x, y)$ ve $g_d(x, y)$ homojen formları için de sağlanır. Yani, eğer \mathcal{T} orijini sabitleyen bir izometri ise, (2) denklemi kullanılarak, her d için

$$f_d(\mathcal{T}(\mathbf{x})) = \lambda g_d(\mathbf{x}) \quad (6)$$

yazılır. Bu önemli sonucun getirdiği avantajdan yararlanmak için problemin öncelikle orijini sabitleyen izometrilere indirgenmesi gerekmektedir. Bunun için de sırasıyla birinci girdi eğrisi ile ikinci girdi eğrisinden elde edilen ve $\mathcal{T}(\mathbf{p}) = \mathbf{q}$ şartını sağlayan \mathbf{p} ve \mathbf{q} gibi iki nokta tespit edilecektir.

2. *İnvariantlar:* Bu basamakta, halihazırda indirgenmiş problem kullanılarak orijini sabitleyen \mathcal{T} izometrisinin hesaplanması için gerekli denklemler elde edilecektir. Bu noktada geometri de dahil olmak üzere birçok alanda kullanıma sahip bir kavram olan *gradyan* kavramından faydalanılacaktır. Bir $f(x, y)$ polinomunun gradyanı $\nabla f(x, y) = (f_x(x, y), f_y(x, y))$ şeklinde tanımlanmaktadır. Diğer yandan bu gradyan vektör alanının normunun karesi $\|\nabla f\|^2 = \nabla f \cdot \nabla f$ şeklinde hesaplanabilir. Kolayca görülebilir ki $\|\nabla f\|^2$ ifadesi izometrilere etkisi altında değişmezdir. Gerçekten de

$$\begin{aligned} \|\nabla(f(Q\mathbf{x}))\|^2 &= \nabla(f(Q\mathbf{x})) \cdot \nabla(f(Q\mathbf{x})) = Q^T(\nabla f)(Q\mathbf{x}) \cdot Q^T(\nabla f)(Q\mathbf{x}) \\ &= QQ^T(\nabla f)(Q\mathbf{x}) \cdot (\nabla f)(Q\mathbf{x}) = (\nabla f)(Q\mathbf{x}) \cdot (\nabla f)(Q\mathbf{x}) = \|(\nabla f)(Q\mathbf{x})\|^2 \end{aligned} \quad (7)$$

olduğu görülür. Bu değişmezlik özelliği (6) denkleminde kullanılırsa, her d için

$$\|\nabla f_d(\mathcal{T}(\mathbf{x}))\|^2 = \lambda^2 \|\nabla g_d(\mathbf{x})\|^2 \quad (8)$$

elde edilir. Diğer yandan, (8) denkleminde yer alan λ parametresini sistemden yok edebilmek için, diğer bir invariant olan *Laplace operatörü* kullanılacaktır. Laplace operatörü bir $f(x, y)$ polinomu için $\Delta f(x, y) = f_{xx} + f_{yy}$ şeklinde tanımlanmaktadır. Benzer şekilde Laplace operatörünün de izometrilere altında değişmez olduğu [2] çalışmasında gösterilmiştir. Buna göre

$$\Delta(f_d(\mathcal{T}(\mathbf{x}))) = (\Delta f_d)(\mathcal{T}(\mathbf{x})) \quad (9)$$

elde edilir. Laplace operatörünün bir f polinomuna art arda k kere uygulanması işlemini $\Delta^k f := \Delta \Delta \cdots \Delta f$ ile göstereceğiz. Şimdi Δ^k operatörünü (8) denkleminde uygularsak

$$\Delta^k(\|\nabla f_d\|^2)(\mathcal{T}(\mathbf{x})) = \lambda^2 \Delta^k(\|\nabla g_d\|^2)(\mathbf{x}) \quad (10)$$

eşitliği elde edilir. Burada, f ve g polinomlarının dereceleri n olduğundan $\|\nabla f\|^2$ ve $\|\nabla g\|^2$ polinomlarının dereceleri $2n - 1$ dir. O halde, $k \geq n$ için $\Delta^k(\|\nabla f_d\|^2) = 0$ ve $\Delta^k(\|\nabla g_d\|^2) = 0$ dir ancak $k = n - 1$ için $\Delta^{n-1}(\|\nabla f_d\|^2)$ ve $\Delta^{n-1}(\|\nabla g_d\|^2)$ ifadeleri sıfırdan farklı iki sabittir. Bu sabitlerin oranını

$$D := \frac{\Delta^{n-1}(\|\nabla f_d\|^2)}{\Delta^{n-1}(\|\nabla g_d\|^2)} \quad (11)$$

ile ifade edelim. Dolayısıyla (10) denkleminde

$$\lambda^2 = D \quad (12)$$

elde edilir. (11) denkleminde elde edilen λ değeri, (6) ve (8) denklemlerinde yerine yazılırsa

$$\begin{aligned} f_d^2(\mathcal{T}(\mathbf{x})) - D g_d^2(\mathbf{x}) &= 0 \\ \|\nabla f_d(\mathcal{T}(\mathbf{x}))\|^2 - D \|\nabla g_d(\mathbf{x})\|^2 &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

denklemlerini oluşturulur. Bu denklemler sisteminin nasıl çözüleceği ise metodun bir sonraki basamağında anlatılacaktır.

3. *Resultant*: Resultant kavramı eliminasyon teorisinin en önemli yapı taşlarından birisidir. $f(x, y)$ ve $g(x, y)$ gibi iki polinomun y değişkenine göre resultantı $Res_y(f, g)$ ile ifade edilir. $Res_y(f, g)$ ifadesinin değeri, f ve g polinomlarının oluşturduğu denklemler sisteminden y değişkeninin elenmesiyle elde edilen x değişkenine bağlı başka bir polinomdur, yani $Res_y(f, g) = h(x)$ şeklindedir. Bu basamakta, öncelikle teknik açıdan eliminasyon teorisine uygun bir yazılım oluşturmak için

$$Q\mathbf{x} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11}x + a_{12}y \\ a_{21}x + a_{22}y \end{pmatrix} \quad (14)$$

olmak üzere,

$$\mathcal{T}(\mathbf{x}) = (u(x, y), v(x, y)) = (a_{11}x + a_{12}y, a_{21}x + a_{22}y) \quad (15)$$

gösterimini tercih edeceğiz. $\mathcal{T}(\mathbf{x})$ yerine u ve v fonksiyonlarının kullanılmasıyla (13) sistemi

$$\begin{aligned} \Phi_1(u, v, x, y) &:= f_d^2(u, v) - D g_d^2(x, y) = 0 \\ \Phi_2(u, v, x, y) &:= \|\nabla f_d(u, v)\|^2 - D \|\nabla g_d(x, y)\|^2 = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

halini alır. Öncelikle (16) sisteminden v parametresini eleyelim ve aşağıdaki notasyonu kullanalım.

$$\eta(u, x, y) := Res_v(\Phi_1, \Phi_2) \quad (17)$$

Bu aşamada metod $\eta(u, x, y)$ polinomunun $u - a_{11}x - a_{12}y$ şeklinde bir doğrusal çarpan içerdiği gerçeğiyle sürdürülecektir. Diğer yandan bu doğrusal çarpanın Φ_1 ve Φ_2 denklemlerinde yerine yazılmasıyla, $\xi_1(v, x, y) := \Phi_1(a_{11}x + a_{12}y, v, x, y)$ ve $\xi_2(v, x, y) := \Phi_2(a_{11}x + a_{12}y, v, x, y)$ elde edilecektir. ξ_1 ve ξ_2 polinomlarının en büyük ortak çarpanı olan polinomu $\mu(v, x, y) := \gcd(\xi_1, \xi_2)$ ile gösterelim. Böylece, $\mu(v, x, y)$ polinomu $v - a_{12}x - a_{12}y$ şeklinde bir doğrusal çarpan içerecektir. Bu doğrusal çarpanlardan u ve v fonksiyonlarının izole edilmesiyle, orijini sabitleyen

$$\mathcal{T}(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} a_{11}x + a_{12}y \\ a_{21}x + a_{22}y \end{pmatrix} \quad (18)$$

izometrisi elde edilmiş olacaktır.

4. *Öteleme*: Metodun bu son basamağında, problemin indirgenmemiş halinde yer alan $Q\mathbf{x} + \mathbf{b}$ izometrisinin öteleme kısmı olan \mathbf{b} vektörü saptanacaktır. Hali hazırda önceki basamaklarda elde edilen λ ve Q değerleri (2) denkleminde yerine yazılarak \mathbf{b} nin bileşenlerini bilinmeyen olarak kabul eden bir denklem sistemi elde edilir. Bu sistemin çözümünden de \mathbf{b} vektörünün tüm bileşenlerinin elde edilmesiyle izometri tam olarak hesaplanmış olur.

3. Bulgular

3.1. Problemin Orijini Sabitleyen İzometrilere İndirgenmesi

Kısım 2.2. de bahsedildiği gibi, problemi, orijini sabitleyen izometrilere indirebilmek için eğrilerin polinom temsillerinden elde edilen ve $\mathcal{T}(\mathbf{p}) = \mathbf{q}$ şartını sağlayan \mathbf{p} ve \mathbf{q} gibi iki nokta oluşturacağız. \mathcal{C}_1 ve \mathcal{C}_2 eğrileri, sırasıyla $f(x, y)$ ve $g(x, y)$ polinomları ile tanımlansın. Kabul edelim ki \mathcal{C}_1 ile \mathcal{C}_2 eğrileri izometrik olsun. Bu durumda $\mathcal{T}(\mathcal{C}_1) = \mathcal{C}_2$ olacak şekilde bir $\mathcal{T}(\mathbf{x}) = Q\mathbf{x} + \mathbf{b}$ izometrisi vardır.

Bir f polinomunun Hessian'ı, Hessian matrisinin determinantı olarak tanımlanır ve $H(f)(x, y)$ ile ifade edilir. Gradyan operatörünün özellikleri kullanılarak, $H(f)(x, y)$ nin de izometrilere altında değişmediği gösterilebilir. $f(x, y)$ ve $g(x, y)$ polinomları kullanılarak $H(f)(x, y)$ ve $H(g)(x, y)$ polinomları oluşturulabilir. $H(f)(x, y)$ ve $H(g)(x, y)$ polinomlarının temsil ettiği eğrileri, sırasıyla, \mathcal{C}_f ve \mathcal{C}_g ifade edelim. Burada, $\{\mathcal{C}_1, \mathcal{C}_f\}$ ve $\{\mathcal{C}_2, \mathcal{C}_g\}$ eğri çiftlerinin kesim kümelerini göz önüne alalım. $\{\mathcal{C}_1, \mathcal{C}_f\}$ eğri çiftinin kesim noktalarının kümesi $\mathcal{P} := \{\mathbf{p}_i\}_{i=1}^{m_1}$ ve $\{\mathcal{C}_2, \mathcal{C}_g\}$ eğri çiftinin kesim noktalarının kümesi de $\mathcal{Q} := \{\mathbf{q}_i\}_{i=1}^{m_2}$ ile ifade edilsin. Bu durumda, \mathcal{C}_1 ile \mathcal{C}_2 eğrileri izometrik olduğundan ve $H(f)(x, y)$ ve $H(g)(x, y)$ izometrilere etkilenmediğinden $\mathcal{T}(\mathcal{C}_f) = \mathcal{C}_g$ elde edilir. Dolayısıyla $\mathcal{T}(\mathcal{C}_1) = \mathcal{C}_2$ ve $\mathcal{T}(\mathcal{C}_f) = \mathcal{C}_g$ olduğundan $\mathcal{T}(\mathcal{P}) = \mathcal{Q}$ elde edilir. Diğer yandan \mathcal{P} ve \mathcal{Q} nokta kümelerinin ağırlık merkezleri (barycenter), $m_1 = m_2 = m$ olmak üzere, $\mathbf{p} := \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \mathbf{p}_i$ ve $\mathbf{q} := \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \mathbf{q}_i$ noktaları ile tanımlanır. Sonuç olarak aşağıdaki önerme elde edilir.

3.1.1. Önerme: \mathcal{C}_1 ve \mathcal{C}_2 eğrileri \mathcal{T} ile izometrik olsun. Bu takdirde $\mathcal{T}(\mathbf{p}) = \mathbf{q}$ dir.

İspat. $\mathcal{T}(\mathcal{P}) = \mathcal{Q}$ olduğundan, $\mathcal{T}(\mathbf{p}_i) = \mathbf{q}_i$ olduğu açıktır. Buradan

$$\mathcal{T}(\mathbf{p}) = Q\mathbf{p} + \mathbf{b} = Q \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \mathbf{p}_i + \mathbf{b} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Q\mathbf{p}_i + \mathbf{b} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (Q\mathbf{p}_i + \mathbf{b}) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \mathbf{q}_i = \mathbf{q} \quad (19)$$

edilir. Böylece ispat tamamlanır. ■

Şimdi \mathbf{p} ve \mathbf{q} noktalarının etkili biçimde hesaplanabilmesi için bir hesaplamalı yöntem belirleyeceğiz. Yöntem sadece \mathbf{p} noktasının hesaplanması için verilecek olup, \mathbf{q} için de aynı yöntem uygulanabilir. $\{\mathcal{C}_1, \mathcal{C}_f\}$ sisteminin kesişimini bulmak için, bu eğrileri temsil eden polinomlardan faydalanılacaktır. Eğri çiftinin kesişim noktaları $f(x, y) = 0$ ve $H(f)(x, y) = 0$ eşitliklerinin oluşturduğu sistemin çözümüdür ve bu noktalar $\mathbf{p}_i = (p_{i1}, p_{i2})$ şeklindedir. $\varphi_1(x) = \text{Res}_y(f, H(f))$ alınırsa, bu durumda her p_{i1} değerleri $\varphi_1(x)$ polinomunun köklerinden bulunabilir. Benzer şekilde $\varphi_2(y) = \text{Res}_x(f, H(f))$ alınırsa, bu durumda p_{i2} değerleri $\varphi_2(y)$ polinomunun köklerinden bulunabilir. Buradan, aşağıdaki önerme gerçeklenir.

3.1.2. Önerme: $\varphi_1(x) := \sum_0^m a_i x^i$ ve $\varphi_2(y) := \sum_0^m b_i y^i$ olmak üzere

$$\mathbf{p} = \frac{1}{m} \left(-\frac{a_{m-1}}{a_m}, -\frac{b_{m-1}}{b_m} \right) \quad (20)$$

şeklindedir.

İspat. Tanım gereği $\mathbf{p} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \mathbf{p}_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (p_{i1}, p_{i2}) = \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m p_{i1}, \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m p_{i2} \right)$ şeklinde yazılabilir. Burada $\sum_{i=1}^m p_{i1}$ ifadesi $\varphi_1(x)$ polinomunun kökler toplamına denk geldiğinden, $\sum_{i=1}^m p_{i1} = -\frac{a_{m-1}}{a_m}$ elde edilir. Benzer şekilde $\sum_{i=1}^m p_{i2}$ ifadesi de $\varphi_2(y)$ polinomunun kökler toplamı olduğundan, $\sum_{i=1}^m p_{i2} = -\frac{b_{m-1}}{b_m}$ elde edilir. ■

Sonuç olarak, $\{C_1, C_f\}$ ve $\{C_2, C_g\}$ eğri çiftlerinin kesim noktalarının kümesinin boştan farklı ve sonlu olduğu durumda \mathbf{p} ve \mathbf{q} noktaları aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$\begin{aligned} \mathbf{p} &= \frac{1}{m} \left(-\frac{a_{m-1}}{a_m}, -\frac{b_{m-1}}{b_m} \right) \\ \mathbf{q} &= \frac{1}{m} \left(-\frac{a'_{m-1}}{a'_m}, -\frac{b'_{m-1}}{b'_m} \right) \end{aligned} \quad (21)$$

Burada a'_i ve b'_i sayıları $g(x,y)$ ve $H(g)(x,y)$ polinomlarının resultantlarından elde edilen tek değişkenli polinomların katsayılarını ifade etmektedir. Yukarıda hesaplanan \mathbf{p} ve \mathbf{q} kullanılarak, C_1 ve C_2 eğrileri ötelenildiğinde, oluşan yeni eğriler için hesaplanan \mathbf{p} ve \mathbf{q} noktaları orijine taşınacaktır. Dolayısıyla, orijinal eğrilerin ötelenmesiyle elde edilen yeni eğriler $T(\mathbf{x}) = Q\mathbf{x}$ ile izometrik olup, problem, orijini sabitleyen izometrilere indirgenmiş olacaktır. Makalenin bu kısmından sonra, ötelenmiş eğrileri aşağıdaki şekilde ifade edeceğiz:

$$\begin{aligned} F(\mathbf{x}) &:= f(\mathbf{x} + \mathbf{p}) \\ G(\mathbf{x}) &:= g(\mathbf{x} + \mathbf{q}) \end{aligned} \quad (22)$$

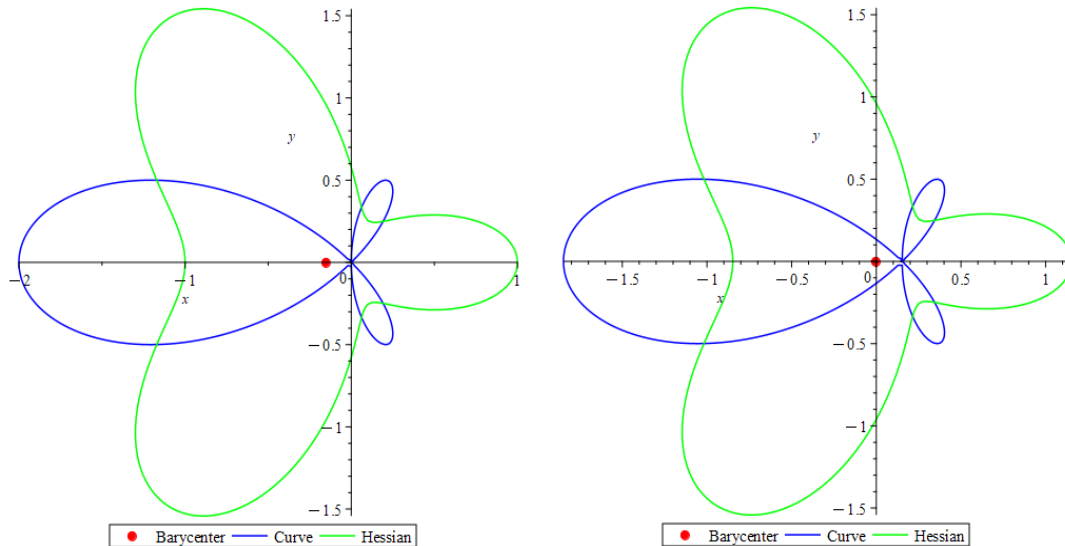
Bu durumu aşağıdaki örnekle açıklayalım.

3.1.3. Örnek: $f(x,y) = (x^2 + y^2)(x^2 + y^2 + 2x) - 4xy^2 = 0$ kapalı formu ile temsil edilen, Kepler'in Folium eğrisi göz önüne alınsın. f polinomunun Hessian'ı $H(f)(x,y) = 48x^4 + 96x^2y^2 + 48y^4 + 192xy^2 - 48x^2 - 16y^2$ şeklindedir. Önerme 3.1.2 den $\mathbf{p} = (-\frac{11}{72}, 0)$ şeklinde hesaplanır. $\mathbf{x} + \mathbf{p}$ ötelemesinin f polinomuna uygulanması $F(x,y)$ polinomu elde edilir. Aşağıda F polinomu ve onun Hessian'ı $H(F)$ verilmiştir.

$$\begin{aligned} F(x,y) &= 26873856x^4 + 53747712x^2y^2 + 26873856y^4 + 37324800x^3 - 70170624xy^2 \\ &\quad - 20870784x^2 + 9465984y^2 + 3380256x - 177023 \\ H(F)(x,y) &= 26873856x^4 + 53747712x^2y^2 + 26873856y^4 - 16422912x^3 + 91072512xy^2 \\ &\quad - 23110272x^2 - 24126336y^2 + 7828128x - 612623 \end{aligned} \quad (23)$$

Gerçekten de F ve $H(F)$ için tekrar Önerme 3.1.2 uygulanırsa $\hat{\mathbf{p}} = (0,0)$ bulunur. Aşağıdaki şekilde, solda f (mavi), $H(f)$ (yeşil) ve kesim noktalarının ağırlık merkezi \mathbf{p} (kırmızı); sağda ise F (mavi), $H(F)$ (yeşil) ve kesim noktalarının ağırlık merkezi $\hat{\mathbf{p}}$ (kırmızı) gösterilmiştir.

Şekil 1. Kepler'in Folium'u ve Hessian'ının kesişimi.



3.2. Orijini Sabitleyen İzometrilere Hesaplanması

Bu kısımda bir önceki kısımdaki ötelemelerin gerçekleştirildiği ve verilen eğrilerin orijini sabitleyen bir izometri ile izometrik olduğu durumda, eğriler arasındaki izometrilere hesaplanması için etkili bir yöntem geliştirilecektir. Kısım 2.2. deki tartışma aşağıdaki ana sonuçta özetlenebilir.

3.2.1. Teorem: C_1 ve C_2 , sırasıyla $F(x, y) = 0$ ve $G(x, y) = 0$ kapalı formları ile temsil edilen iki cebirsel düzlem eğrisi olsun. Ayrıca, $\Phi_1(u, v, x, y)$ ve $\Phi_2(u, v, x, y)$ polinomları (16) denklemindeki gibi tanımlansın. Eğer C_1 ve C_2 eğrileri $\mathcal{T}(x) = Qx$ ile izometrik ise, bu takdirde aşağıdakiler sağlanır:

- $\eta(u, x, y) := \text{Res}_v(\Phi_1, \Phi_2)$ polinomu $u - a_{11}x - a_{12}y$ şeklinde bir doğrusal çarpan içerir.
- $\xi_1(v, x, y) := \Phi_1(a_{11}x + a_{12}y, v, x, y)$ ve $\xi_2(v, x, y) := \Phi_2(a_{11}x + a_{12}y, v, x, y)$ polinomlarının en büyük ortak çarpanı $\mu(v, x, y) := \text{gcd}(\xi_1, \xi_2)$ olmak üzere, $\mu(v, x, y)$ polinomu $v - a_{21}x - a_{22}y$ şeklinde bir doğrusal çarpan içerir.

İspat. Kabul edelim ki C_1 ve C_2 eğrileri $\mathcal{T}(x) = Qx$ ile izometrik olsun. Bu takdirde, $u(x, y) = a_{11}x + a_{12}y$, $v(x, y) = a_{21}x + a_{22}y$ polinomları (16) denklemi ile verilen ve F ile G den üretilen

$$\begin{aligned}\Phi_1(u, v, x, y) &:= F_d^2(u, v) - DG_d^2(x, y) = 0 \\ \Phi_2(u, v, x, y) &:= \|\nabla F_d(u, v)\|^2 - D\|\nabla G_d(x, y)\|^2 = 0\end{aligned}\tag{24}$$

sisteminin çözümüdür. Yani u ve v , Φ_1 ve Φ_2 polinomlarının ortak köküdür. Resultant tanımından $\eta(u, x, y) = 0$ dır ancak ve ancak Φ_1 ve Φ_2 nin ortak kökü vardır. O halde $u = a_{11}x + a_{12}y$, $\eta(u, x, y)$ nin bir köküdür. Bunun anlamı $\eta(u, x, y)$ polinomunun $u - a_{11}x - a_{12}y$ şeklinde bir çarpana sahip olmasıdır. Bu ise teoremin ifadesindeki (i) önermesini kanıtlar. $u = a_{11}x + a_{12}y$ çözümü Φ_1 ve Φ_2 polinomlarında yerine yazılırsa $\xi_1(v, x, y)$ ve $\xi_2(v, x, y)$ polinomları elde edilir. u ve v , sistemin çözümü olduğundan $v = a_{21}x + a_{22}y$ hem ξ_1 polinomunun, hem de ξ_2 polinomunun kökü olmalıdır. En büyük ortak çarpan tanımından $v = a_{21}x + a_{22}y$ aynı zamanda $\mu(v, x, y)$ polinomunu da bir köküdür. O halde, $\mu(v, x, y)$ polinomu $v - a_{21}x - a_{22}y$ şeklinde bir çarpan içerir. Bu durum da teoremin ifadesinde yer alan (ii) önermesini kanıtlar ve ispat tamamlanır.

Teorem 3.2.1., hesaplama anlamında önemli sonuçlar ortaya çıkarmaktadır. C_1 ve C_2 eğrileri arasındaki izometrilere tespit etmek için, öncelikle Φ_1 ve Φ_2 polinomları oluşturulur. Ardından, bu iki polinomun v değişkenine göre resultantı alınıp, sistemden v değişkeni elenmiş olur ve $\eta(u, x, y)$ polinomu bulunur. Ana teoreme göre $\eta(u, x, y)$ polinomu özel bir doğrusal çarpan içermektedir. Bu doğrusal çarpanları bulmak için $\eta(u, x, y)$ polinomunu çarpanlara ayırmak yeterlidir. Tüm çarpanlar arasından doğrusal olanlar seçilir ve bu seçilen çarpanlardan $u = a_{11}x + a_{12}y$ doğrudan bulunur. Bulunan $u = a_{11}x + a_{12}y$ ifadeleri Φ_1 ve Φ_2 de yerine yazılarak $\mu(v, x, y)$ polinomu bulunur. Ardından, $\mu(v, x, y)$ polinomu çarpanlarına ayrılarak, bu çarpanlar arasından yine doğrusal olanlar seçilir. Her bir doğrusal çarpan $v = a_{21}x + a_{22}y$ çözümü elde edilir. Böylece Q ortogonal matrisinin tüm bileşenleri, yani $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$ elde edilmiş olur. Bulunan tüm değerler, problemin indirgenmesinden önce verilen $f(x, y)$ ve $g(x, y)$ polinomları ile ilgili $f(Qx + b) = \lambda g(x)$ eşitliğinde yerine yazılarak, elde edilen denklemden b vektörünün bileşenleri çözümlenerek olası tüm $\mathcal{T}(x) = Qx + b$ izometrilere hesaplanmış olur. Bu süreç, bir sonraki kısımda bir algoritmaya dönüştürülmüştür.

3.3. Algoritma

Önceki kısımlarda elde edilen sonuçlar ışığında aşağıdaki ImplSo2D isimli algoritma (bkz. **Algoritma 1**), verilen iki cebirsel düzlem eğrisi arasındaki tüm izometrilere tespit etmektedir.

Algoritma 1. Implso2D

Input: Sırasıyla $f(x, y)$ ve $g(x, y)$ kapalı formları ile tanımlı, birden çok bileşene sahip olmayan, çember ve doğrudan farklı iki C_1, C_2 cebirsel düzlem eğrisi.

Output: C_1, C_2 arasındaki izometrilere ya da “Eğriler izometrik değildir” uyarısı.

Procedure: Implso2D(f, g)

1. p ve q ağırlık merkezlerini hesapla.
2. Eğer p ve q noktaları hesaplanamıyorsa “FAIL”.
3. $L := \emptyset$ ve $M := \emptyset$ atamalarını yap.
4. $F := f(x + p)$ ve $G := f(x + q)$ atamalarını yap
5. (24) sisteminde tanımlanan Φ_1 ve Φ_2 polinomlarını oluştur.
6. $\eta(u, x, y) := Res_v(\Phi_1, \Phi_2)$ polinomunu hesapla.
7. $\eta(u, x, y)$ polinomunu çarpanlara ayırarak $u - a_{11}x - a_{12}y$ doğrusal çarpanlarını hesapla.
8. Her $u - a_{11}x - a_{12}y$ doğrusal çarpanı için
9. $\xi_1(v, x, y) := \Phi_1(a_{11}x + a_{12}y, v, x, y)$ ve $\xi_2(v, x, y) := \Phi_2(a_{11}x + a_{12}y, v, x, y)$ polinomlarını ve $\mu(v, x, y) := \gcd(\xi_1, \xi_2)$ polinomunu hesapla.
10. $\mu(v, x, y)$ polinomunu çarpanlara ayırarak $v - a_{21}x - a_{22}y$ doğrusal çarpanlarını hesapla.
11. Her $v - a_{21}x - a_{22}y$ doğrusal çarpanı için
12. $F(u, v) = \lambda G(x, y)$ denkleminin sağlandığını kontrol et.
13. Doğrulandığı takdirde (u, v) çözümünü L listesine ekle.
14. Eğer $L \neq \emptyset$ ise
15. L listesindeki her (u, v) çözümü için
16. $f(u + b_1, v + b_2) = \lambda g(x, y)$ denklemini b_1 ve b_2 bilinmeyenleri için çöz.
17. $[(u, v), \lambda, (b_1, b_2)]$ çözüm kümesini M listesine ekle.
18. Eğer $M = \emptyset$ ise “Eğriler izometrik değildir” uyarısını ver aksi halde M listesini ver.

Algoritmanın çalışma prensibinin anlaşılması için aşağıdaki ayrıntılı örnek sunulmuştur.

3.3.1. Örnek: Aşağıdaki polinomlarla temsil edilen Cayley's Sextic eğrilerini göz önüne alalım.

$$\begin{aligned} f(x, y) &= -8x^3 - 12(5x^2 + 9y^2)(x^2 + y^2) - 96x(x^2 + y^2)^2 + 64(x^2 + y^2)^3 \\ g(x, y) &= 568 - 726\sqrt{2}xy^2 + 1782\sqrt{2}x^2y - 242\sqrt{2}x^3 - 432x^3y - 432xy^3 + 828x^2 + 4764y^2 \\ &\quad + 2316y^4 + 396x^4 - 300\sqrt{2}x - 1080xy + 1836\sqrt{2}y + 3186\sqrt{2}y^3 + 2712x^2y^2 \\ &\quad - 48\sqrt{2}x^5 + 432\sqrt{2}y^5 - 48\sqrt{2}xy^4 - 96\sqrt{2}x^3y^2 + 432\sqrt{2}x^4y + 864\sqrt{2}x^2y^3 \\ &\quad + 192x^2y^4 + 64y^6 + 192x^4y^2 + 64x^6 \end{aligned} \quad (25)$$

Burada $g(x, y)$ ile temsil edilen eğri, $f(x, y)$ polinomu ile aşağıdaki ortogonal matris ve ötelemeye sahip $\mathcal{T}(x) = Qx + b$ izometrisi uygulanarak elde edilmiştir:

$$Q = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}, b = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (26)$$

Bu sayede oluşturulan eğrilerin arasında en az bir izometri olması garanti altına alınmıştır. Algoritma bu eğri çiftine uygulandığında, öncelikle ağırlık merkezleri

$$p = \left(-\frac{2721}{27436}, 0\right), q = \left(-\frac{2721\sqrt{2}}{54872}, -\frac{52151\sqrt{2}}{54872}\right) \quad (27)$$

şeklinde hesaplanmıştır. f ve g bu noktalar ile ötelendikten sonra, orijini sabitleyen bir izometri ile izometrik olan F ve G polinomları bulunmuştur. Buradan da F ve G polinomları için (24) sistemi oluşturulmuş ve böylece

$$\eta(u, x, y) = 2u^2 - x^2 + 2xy - y^2 \quad (28)$$

elde edilmiştir. $\eta(u, x, y)$ polinomu çarpanlara ayrıldığında,

$$\begin{aligned} L_{1u} &= u + \frac{\sqrt{2}}{2}x - \frac{\sqrt{2}}{2}y \\ L_{2u} &= u - \frac{\sqrt{2}}{2}x + \frac{\sqrt{2}}{2}y \end{aligned} \quad (29)$$

şeklinde iki adet doğrusal çarpan bulunmuştur. Bu doğrusal çarpanların yerine yazılıp, $\mu(v, x, y)$ polinomunun çarpanlara ayrılmasıyla, L_{1u} çarpanına karşılık

$$\begin{aligned} L_{1v} &= v - \frac{\sqrt{2}}{2}x - \frac{\sqrt{2}}{2}y \\ L_{2v} &= v + \frac{\sqrt{2}}{2}x + \frac{\sqrt{2}}{2}y \end{aligned} \quad (30)$$

şeklinde iki doğrusal çarpan ve yine L_{2u} çarpanına karşılık

$$\begin{aligned} L_{3v} &= v - \frac{\sqrt{2}}{2}x - \frac{\sqrt{2}}{2}y \\ L_{4v} &= v + \frac{\sqrt{2}}{2}x + \frac{\sqrt{2}}{2}y \end{aligned} \quad (31)$$

aynı iki doğrusal çarpan elde edilmiştir. Toplam 4 çözüm adayı arasından, eşitlikleri sağlamayan 2 tanesi elendikten sonra,

$$Q_1 = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & 1 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}, \quad Q_2 = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ -1 & 1 \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (32)$$

ortogonal matrisleri elde edilmiştir. Orijinal eğrilere geri dönüp, Q_1 ve Q_2 ye karşılık gelen $\mathbf{b}_1 = (-1, 1)^T$ ve $\mathbf{b}_2 = (-1, -1)^T$ ötelemeleri bulunup, sonuçta iki eğri arasında $f_1(x) = Q_1x + \mathbf{b}_1$ ve $f_2(x) = Q_2x + \mathbf{b}_2$ izometrilere hesaplanmıştır. Bu örnekteki hesaplamaların tümü 0.125 saniyede tamamlanmıştır.

3.4. Testler ve Performans

Bölüm 3.3. te verilen algoritma ImpIso2D, bilgisayar cebir sistemi Maple [14] kullanılarak implement edilmiştir. Implementasyon, 2.4 Ghz Intel Core i5 işlemciye ve 8 GB belleğe sahip bir bilgisayarda test edilmiştir. Bu çalışmada sunulan örnekler ve tüm testler ikinci yazarın kişisel web sayfasında [15] tüm araştırmacılara açık şekilde sunulmuştur. Tüm örnekler ve testlerde, izometrik bir eğri çifti elde edebilmek için, $f(x, y)$ kapalı formu ile temsil edilen bir C_1 eğrisi alınıp, $g(x, y)$ polinomu C_2 eğrisini temsil edecek şekilde, $f(x, y)$ polinomuna Örnek 3.3.1 de verilen izometri uygulanarak bir $g(x, y)$ polinomu elde edilmiştir.

Testlere **Tablo 1.** de verilen polinomlarla temsil edilen eğrilerin izometrisini tespit ederek başlayalım. Tablonun ilk sütununda eğrinin ismi, ikinci sütununda eğrinin derecesi ve son sütununda da eğrinin kapalı formu verilmiştir. Ayrıca tabloda yer alan eğrilerin çizimleri **Şekil 2.** de verilmiştir. **Tablo 2.** de **Tablo 1.** de verilen eğrilerin izometrilere ve simetrisinin hesaplanması için harcanan süreler saniye cinsinden verilmiştir. **Tablo 2.** de ilk sütunda eğri isimleri, ikinci sütunda eğrilerin ihtiva ettiği izometri/simetri sayıları, üçüncü sütunda izometrisinin hesaplanmasında harcanan süre ve son sütunda da simetrisinin hesaplanmasında harcanan süre bulunmaktadır. Simetrisinin izometrilere göre daha uzun sürede hesaplandığı tablodaki verilerden açıkça görülmektedir.

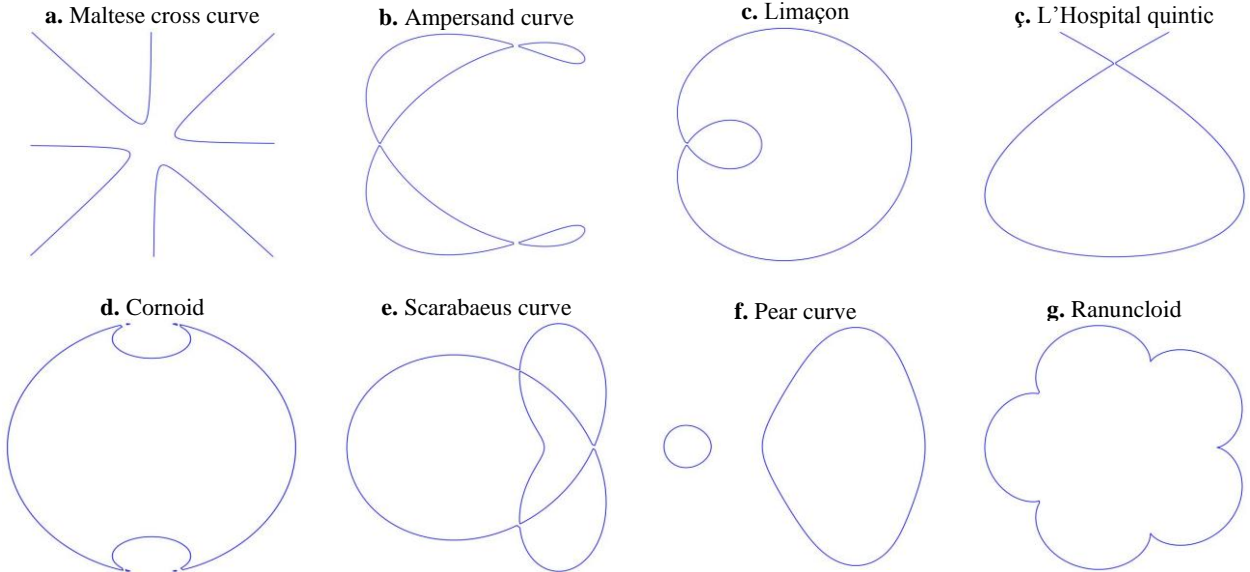
Tablo 1. Çeşitli eğrilerin kapalı temsilleri.

İsim	Derece	Kapalı Temsil
Maltese Cross Curve	3	$x^3y - xy^3 - x^2 - y^2$
Ampersand Curve	4	$6x^4 + 6x^2y^2 + 4y^4 - 21x^3 - 11xy^2 + 19x^2 - 3y^2$
Limaçon	4	$x^4 + 2x^2y^2 + y^4 - 4x^3 - 4xy^2 + 3x^2 - y^2$
L'Hospital Quintic	5	$64y^5 - 625x^4 - 1000x^2y^2 - 400y^4 + 1000x^2y + 800y^3$ $-200x^2 - 560y^2 + 160y - 16$
Cornoid	6	$x^6 + 3x^4y^2 + 3x^2y^4 + y^6 + 3x^4 - 6x^2y^2 - 5y^4 + 8y^2 - 4$
Scarabaeus Curve	6	$x^6 + 3x^4y^2 + 3x^2y^4 + y^6 + 6x^5 + 12x^3y^2 + 6xy^4 + 5x^4 + 17x^2y^2 - 4y^4$
Pear Curve	8	$x^8 + 4x^6y^2 + 6x^4y^4 + 4x^2y^6 + y^8 + 4x^7 + 12x^5y^2 + 12x^3y^4 + 4xy^6 + 6x^6$ $+14x^4y^2 + 10x^2y^4 + 2y^6 + 6x^5 + 4x^3y^2 - 2xy^4 + 5x^4$ $+2x^2y^2 - 3y^4 + 2x^3 + 2xy^2 + x^2 + y^2 - 1$
Ranuncloid	12	$x^{12} + 6x^{10}y^2 + 15x^8y^4 + 20x^6y^6 + 15x^4y^8 + 6x^2y^{10} + y^{12} - 42x^{10} - 210x^8y^2$ $-420x^6y^4 - 420x^4y^6 - 210x^2y^8 - 42y^{10} - 21x^8 - 84x^6y^2 - 126x^4y^4$ $-84x^2y^6 - 21y^8 - 812x^6 - 2436x^4y^2 - 2436x^2y^4 - 812y^6 + 93312x^5$ $-933120x^3y^2 + 466560xy^4 - 32025x^4 - 64050x^2y^2 - 32025y^4$ $-1286250x^2 - 1286250y^2 - 52521875$

Tablo 2. Tablo 1. de verilen eğrilerin izometri ve simetrilerinin hesaplanması için harcanan saniye cinsinden süreler.

İsim	İzo./Sim. Sayısı	Simetriler (sn)	İzometriler (sn)
Maltese Cross Curve	8	0.547	0.344
Ampersand Curve	2	0.094	0.001
Limaçon	2	0.016	0.001
L'Hospital Quintic	2	0.078	0.001
Cornoid	4	0.078	0.016
Scarabaeus Curve	2	0.171	0.031
Pear Curve	2	0.313	0.031
Ranuncloid	10	16.094	2.984

Şekil 2. Tablo 1. de verilen eğrilerin şekilleri.

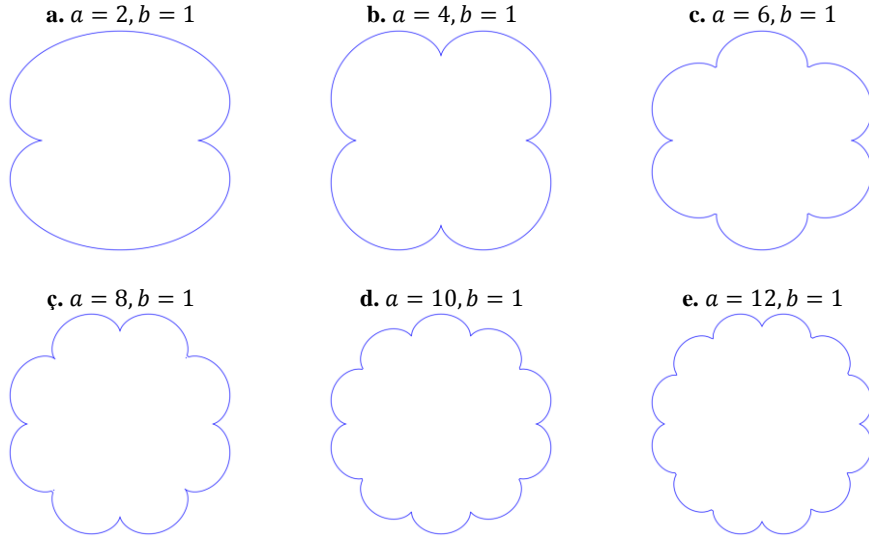


Şimdi de algoritmanın simetrisi bulmadaki yeterliliğini daha iyi anlayabilmek için çok simetriye sahip bir eğri ailesi üzerinde sonuçları inceleyelim. Bunun en uygun eğri ailelerinden biri olan “epicycloid eğri ailesi” seçilmiştir. Epicycloid eğri ailesi

$$\begin{aligned} x &= (a + b) \cos \phi - b \cos \frac{a+b}{b} \phi \\ y &= (a + b) \sin \phi - b \sin \frac{a+b}{b} \phi \end{aligned} \quad (33)$$

parametrik denkleme sahiptir. Bu eğri ailesinden $b = 1$ değerine karşılık, $a = 2, 4, 6, 8, 10, 12$ değerleri seçilmiştir. Bu değerler için parametrik denklem kapalı forma dönüştürülmüş ve her bir eğri için simetri hesaplaması yapılmıştır. İlgili değerler için eğrilerin şekilleri **Şekil 3.** de verilmiştir. Hesaplama süreleri **Tablo 3.** de sunulmuştur. Tabloda, ilk sütunda a ve b parametreleri, ikinci sütunda oluşan eğrinin derecesi, üçüncü sütunda oluşan eğrinin simetri sayısı ve son sütunda da tüm simetrilerin hesaplanmasında geçen süre verilmiştir. Tablodan da görüldüğü üzere, algoritma bu eğrilerin tüm simetrilerini en fazla süren hesaplamada bile yaklaşık 42 saniye gibi bir sürede hesaplayabilmektedir.

Şekil 3. Örneklerde kullanılan epicycloidlerin şekilleri.



Tablo 3. Seçili epicycloidlerin simetrilerinin hesaplanması için harcanan saniye cinsinden süreler.

Parametre	Derece	Simetri Sayısı	Süre (sn)
$a = 2, b = 1$	6	4	0.219
$a = 4, b = 1$	10	8	0.094
$a = 6, b = 1$	14	12	0.782
$a = 8, b = 1$	18	16	0.938
$a = 10, b = 1$	22	20	41.516
$a = 12, b = 1$	26	24	19.704

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada kapalı formda temsil edilen cebirsel düzlem eğrilerinin izometri ve simetrilerini hesaplayan yeni bir algoritma sunulmuştur. Algoritma, güçlü bir matematiksel altyapıya dayandırılmıştır. Bu altyapı, eğrileri temsil eden polinomlardan elde edilen cebirsel denklemler üzerine kurulmuştur. Diğer yandan izometrilere tespiti için bu denklemlerin direkt olarak çözümü yerine değişmezlik kavramı sayesinde eliminasyon teorisinden

faydalanılmıştır. Böylece birçok bilinmeyene sahip ve bu bilinmeyenlere göre doğrusal olmayan sistemlerin çözümünden sakınılmıştır.

Sunulan algoritma tam olup, sadece belli başlı izometri/simetrileri değil, eğrilerin ihtiva ettiği tüm izometri/simetrileri tespit edebilmektedir. Algoritma, Maple bilgisayar cebir sistemi kullanılarak implement edilmiş ve bu implementasyon ile geniş çaplı testler yürütülmüştür. Test sonuçlarının başarısı ve algoritmanın etkinliği tablolarda verilmiştir.

Gelecek çalışmalarda, bu çalışmada sunulan metodun, en genel durum olan projektif denklik ve simetrilere genelleştirilmesi planlanmaktadır. Kapalı formda temsil edilen cebirsel düzlem eğrilerinin projektif denklik ve simetrileri için, burada verilen indirgeme metodunu uygulamak için başka metot ve yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Teşekkür

Yazarlar Prof. Juan Gerardo Alcázar'a, sonsuz desteği, yardımını hiçbir zaman esirgemediği ve tüm süreçlerde yanlarında olduğu için saygı ve teşekkürlerini sunar.

Kaynakça

- [1] Alcázar, J.G., Hermoso, C., Muntingh G. 2015. Symmetry detection of rational space curves from their curvature and torsion. *Computer Aided Geometric Design*, 33, 51–65.
- [2] Alcázar, J.G., Lávička, M., Vršek, J. 2019. Symmetries and similarities of planar algebraic curves using harmonic polynomials. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 357, 302–318.
- [3] Alcázar, J.G., Díaz Toca, G.M., Hermoso, C. 2019. On the problem of detecting when two implicit plane algebraic curves are similar. *International Journal of Algebra and Computation*, 29(5), 775–793.
- [4] Alcázar, J.G., Quintero, E. 2020. Affine equivalences of trigonometric curves. *Acta Applicandae Mathematicae*, 170, 691-708.
- [5] Alcázar, J.G., Quintero, E. 2020. Affine equivalences, isometries and symmetries of ruled rational surfaces. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 364, 112339.
- [6] Alcázar, J.G., Hermoso, C. 2021. Computing projective equivalences of planar curves birationally equivalent to elliptic and hyperelliptic curves. *Computer Aided Geometric Design*, 91, 102048.
- [7] Alcázar, J.G., Gözütok, U., Çoban, H.A., Hermoso, C. 2022. Detecting affine equivalences between implicit planar algebraic curves. *Acta Applicandae Mathematicae*, 182, 2.
- [8] Alcázar, J.G., Lávička, M., Vršek, J. 2023. Computing symmetries of implicit algebraic surfaces. *Computer Aided Geometric Design*, 104, 102221.
- [9] Bizzarri M., Lávička, M., Vršek, J. 2020. Computing projective equivalences of special algebraic varieties. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 367, 112438.
- [10] Coxeter, H.S.M. 1969, *Introduction to Geometry*. 2. Ed., Wiley, 496s.
- [11] Hauer, M., Jüttler, B., Schicho, J. 2018. Projective and affine symmetries and equivalences of rational and polynomial surfaces. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 349, 424–437.
- [12] Jüttler, B., Lubbes, N., Schicho J. 2022. Projective isomorphisms between rational surfaces. *Journal of Algebra*, 594, 571–596.
- [13] Gözütok, U., Çoban, H.A., Sağiroğlu, Y., Alcázar, J.G. 2023. A new method to detect projective equivalences and symmetries of rational 3D curves. *Journal of Computational and Applied Mathematics Vol. 419*, 114782.
- [14] Maple, 2022. Maplesoft, a division of Waterloo Maple Inc. Waterloo, Ontario.
- [15] <https://www.ugurgozutok.com/>
- [16] Pençe, İ. 2012. El yazısı karakterlerinin kapalı cebirsel eğrilerle modellenmesi ve sınıflandırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 68s. Isparta.
- [17] Yöndem, K.B. 2005. Different approaches on the implementation of implicit polynomials in visual tracking, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 68s. İstanbul.

The New Conformable Methods to Solve Fractional Partial Differential Equations

Halil Hüseyin Avcı¹, Halil Anaç^{*2}

¹Gümüşhane University Graduate Education Institute Department of Mathematical Engineering,
GÜMÜŞHANE

^{*2}Gümüşhane University Torul Vocational School Department of Computer Technologies, GÜMÜŞHANE

(Alınış / Received: 04.07.2023, Kabul / Accepted: 16.08.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 31.08.2023)

Keywords

Conformable time-fractional
generalized Burgers
equation,
Conformable Mohand
Adomian decomposition
method,
Conformable Mohand
transform

Abstract: In this article, two novel methods called conformable q-Mohand homotopy analysis transform method (Cq-MHATM) and conformable Mohand Adomian decomposition method (CMADM) are utilized to examine the novel numerical solutions for nonlinear conformable time-fractional generalized Burgers equation with proportional delay. The first of the two new methods suggested, Cq-MHATM, is a hybrid method that combines q-homotopy analysis transform method and Mohand transform in the sense of conformable derivative. The other method, CMADM is also a hybrid method that combines Adomian decomposition method and Mohand transform in the sense of conformable derivative. The computer simulations were worked out to prove that the suggested methods work and are trusted.

Kesirli Mertebeden Kısmi Diferansiyel Denklemlerini Çözmek için Yeni Uyumlu Metotlar

Anahtar Kelimeler

Uyumlu zaman-kesirli
mertebeden genelleştirilmiş
Burgers denklemi,
Uyumlu Mohand Adomian
ayırıştırma metodu,
Uyumlu Mohand dönüşümü

Öz: Bu makalede, uyumlu q-Mohand homotopi analiz dönüşüm yöntemi (Uq-MHADY) ve uyumlu Mohand Adomian ayrıştırma yöntemi (UMAAY) olarak adlandırılan iki yeni yöntem, oransal gecikmeli doğrusal olmayan uyumlu zaman-kesirli mertebeden genelleştirilmiş Burgers denkleminin yeni sayısal çözümlerini incelemek için kullanılmaktadır. Önerilen iki yeni yöntemden ilki olan Uq-MHADY, q-homotopi analiz dönüşüm yöntemi ile uyumlu Mohand dönüşümünün birleşiminden oluşan hibrit bir yöntemdir. Diğer yöntem olan CMADM ise Adomian ayrıştırma yöntemi ile uyumlu Mohand dönüşümünün birleşiminden oluşan hibrit bir yöntemdir. Önerilen yöntemlerin etkin çalıştığını ve güvenilir olduğunu göstermek için bilgisayar simülasyonları yapılmaktadır. Kesin çözümler bulunan çözümlerle karşılaştırıldığında, yeni tekniklerin her ikisinin de basit, güçlü ve oransal gecikmeli doğrusal olmayan uyumlu zaman-kesirli mertebeden kısmi diferansiyel denklemi çözmek için iyi çalıştığını görülmektedir.

*Corresponding Author, email: halilanac0638@gmail.com

1. Introduction

The arbitrary order of fractional calculus (FC) goes beyond the integer order of calculus. It was talked about when the famous scientists Leibniz and L'Hospital first talked to each other around 1695. In recent years, many authors have started to look into fractional calculus because it can be used to give accurate descriptions of many different kinds of nonlinear events. Fractional order differential equations are a type of differential equation that has effects on material properties that are not local and on genetic material. Fractional calculus was studied and described by a number of well-known mathematicians. Their work laid the groundwork for fractional calculus. Now, fractional

partial differential equations are often used to make nonlinear models and study systems that change over time. Fractional-order calculus theory has been linked to many things, such as chaos theory. Fractional differential equations are used to describe the features of natural systems that don't behave in a straight line. We use a number of analytical and numerical methods to solve the time-fractional partial differential equations (TFDEs) that describe nonlinear processes [1-13].

Mohand and Mahgoub [14] created a new integral transform which is called Mohand transform. The mechanics and electrical circuit problems were resolved through the utilization of the Mohand transform. It is provided a method for solving second-order linear Volterra integral equations utilizing the Mohand transform. The utilization of Mohand transform was employed in order to address linear partial integro-differential equations. It is presented the utilization of Mohand transform in the resolution of linear Volterra integro-differential equations. The utilization of Laplace transform for addressing population growth and decay issues is demonstrated [14-19]. The research focuses on the numerical solution of conformable time-fractional partial differential equations with proportional delay defined by

$$\begin{cases} D_t^\alpha w(x, t) = \psi \left(x, w(\rho_0 x, \sigma_0 t), \frac{\partial w(\rho_1 x, \sigma_1 t)}{\partial x}, \dots, \frac{\partial^m w(\rho_m x, \sigma_m t)}{\partial x^m} \right), \\ w^{(k)}(x, 0) = \varphi_k(x), \end{cases} \quad (1)$$

where $\rho_i, \sigma_i \in (0,1)$ for all $i \in N$, φ_k is initial value, ψ differential operator and D_t^α is conformable time-fractional operator.

There aren't many articles in the literature about TFPDEs with proportional delay. These include the Chebyshev pseudospectral method [20], the homotopy analysis method [21], the spectral collocation and waveform relaxation methods [22], and the iterated pseudospectral method [23]. RDTM was used by Abazari and Ganji [24] to find estimated solutions to PDEs. The proportional delay was used in these methods. Abazari and Kilicman [25] used DTM to get analytical solutions to nonlinear integro-differential equations with proportional delay. DTM was used to solve the equations and get these results. Tanthanuch [26] used a method called "group analysis" to solve the "nonhomogeneous inviscid Burgers equation with proportional delay." Sakar et al. [27], Biazar and Ghanbari [28] used the homotopy perturbation method to find analytical solutions to TFPDE with proportional delay. Chen and Wang [29] solved a neutral functional-differential problem with proportional delays using the variational iteration method. Singh and Kumar [30] found an alternative approximation solution to the initial valued autonomous system of TFPDE with proportional delay by using an additional variational iteration method, or AVIM for short. The main goal of this study is to come up with a new method: the conformable q-Mohand homotopy analysis transform method (Cq-MHATM).

Here is a list of the rest of the study: The basic definitions and theorems used are given in the second part. In Section 3, the new conformable fractional numerical methods are presented. In section 4, the application of the suggested methos to the equations is presented. The result is given in section 5.

2. Material and Method

Now let's give the definitions to be used in the study.

Definition 2.1. [31-34] Let a function $f: [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$. Then, the conformable fractional derivative of f order α is described by

$$T_\alpha(f)(x) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{f(x + \varepsilon x^{1-\alpha}) - f(x)}{\varepsilon}, \quad (2)$$

for all $x > 0, \alpha \in (0, 1]$.

Theorem 2.1. [31-32, 34] For $\alpha \in (0, 1], m, n$ be α –differentiable at a point $x > 0$. Then

$$(i) T_\alpha(am + bn) = aT_\alpha(m) + bT_\alpha(n), \text{ for all } a, b \in \mathbb{R}, \quad (3)$$

$$(ii) T_\alpha(x^p) = px^{p-1}, \text{ for all } p \in \mathbb{R}, \quad (4)$$

$$(iii) T_\alpha(\lambda) = 0, \text{ for all constant functions, } m(t) = \lambda, \tag{5}$$

$$(iv) T_\alpha(mn) = mT_\alpha(n) + nT_\alpha(m), \tag{6}$$

$$(v) T_\alpha\left(\frac{m}{n}\right) = \frac{nT_\alpha(m) - mT_\alpha(n)}{n^2}. \tag{7}$$

Definition 2.2. For $0 < \alpha \leq 1$, $f: [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ be real valued function. Then, the conformable fractional Mohand transform (CFMT) of order α of f is defined by

$${}_cM_\alpha[f(t)] = R_\alpha(r) = r^2 \int_0^\infty \exp\left(\frac{-rt^\alpha}{\alpha}\right) f(t)t^{\alpha-1} dt. \tag{8}$$

Definition 2.3. For $0 < \alpha \leq 1$, $f: [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ be real valued function. The conformable Mohand transform for the conformable fractional-order derivative of the function $f(t)$ is described by

$${}_cM_\alpha[T_\alpha f(t)](v) = rR_\alpha(r) - r^2 f(0). \tag{9}$$

2.1. The New Conformable Fractional Numerical Methods

This section introduces the conformable q-Mohand homotopy analysis transform method and conformable Mohand Adomian decomposition method.

2.1.1. Conformable q-Mohand homotopy analysis transform method

We will introduce a new method. Consider the conformable time-fractional order nonlinear partial differential equation (CTFNPDE) with proportional delay to explain the fundamental idea of Cq-MHATM:

$${}_tT_\alpha w(x, t) + Aw(\rho_i x, \sigma_i t) + Hw(\rho_i x, \sigma_i t) = f(x, t), t > 0, n - 1 < \alpha \leq n, \tag{10}$$

where M is a linear operator, N is a nonlinear operator, $f(x, t)$ is a source term, $\rho_i, \sigma_i \in (0, 1)$ and ${}_tT_\alpha$ is a conformable fractional derivative of order α .

Applying the conformable fractional Mohand transform to Eq. (10) and utilizing the initial condition, then we have

$$rR_\alpha(r) - r^2 w(x, 0) + {}_cM_\alpha[Aw(\rho_i x, \sigma_i t) + Hw(\rho_i x, \sigma_i t)] = {}_cM_\alpha[f(x, t)]. \tag{11}$$

Rearranging the last equation, then we get

$${}_cM_\alpha[w(x, t)] - rw(x, 0) + \frac{1}{r} {}_cM_\alpha[Aw(\rho_i x, \sigma_i t) + Hw(\rho_i x, \sigma_i t)] - \frac{1}{r} {}_cM_\alpha[f(x, t)] = 0. \tag{12}$$

With the help of HAM, we can describe the nonlinear operator for real function $\varphi(x, t; q)$ as follows:

$$\begin{aligned} N[\varphi(x, t; q)] &= {}_cM_\alpha[\varphi(x, t; q)] - r\varphi(x, t; q) (0^+) + \frac{1}{r} ({}_cM_\alpha[A\varphi(\rho_i x, \sigma_i t; q)] \\ &+ {}_cM_\alpha[H\varphi(\rho_i x, \sigma_i t; q)] - \frac{1}{r} {}_cM_\alpha[f(x, t)]), \end{aligned} \tag{13}$$

where $q \in \left[0, \frac{1}{n}\right]$.

We construct a homotopy as follows:

$$(1 - nq) {}_cM_\alpha[\varphi(x, t; q) - w_0(x, t)] = hqH^*(x, t)H[\varphi(\rho_i x, \sigma_i t; q)], \tag{14}$$

where, $h \neq 0$ is an auxiliary parameter and ${}_cM_\alpha$ demonstrates conformable Mohand transform. For $q = 0$ and $q = \frac{1}{n}$, the results of Eq. (14) are as follows:

$$\varphi(x, t; 0) = w_0(x, t), \varphi\left(x, t; \frac{1}{n}\right) = w(x, t). \tag{15}$$

Thus, by amplifying q from 0 to $\frac{1}{n}$, then the solution $\varphi(x, t; q)$ converges from $w_0(x, t)$ to the solution $w(x, t)$. Using the Taylor theorem around q and then expanding $\varphi(x, t; q)$, we get

$$\varphi(x, t; q) = w_0(x, t) + \sum_{i=1}^{\infty} w_m(x, t)q^m, \tag{16}$$

where

$$w_m(x, t) = \frac{1}{m!} \frac{\partial^m \varphi(x, t; q)}{\partial q^m} \Big|_{q=0}. \tag{17}$$

Eq. (16) converges at $q = \frac{1}{n}$ for the appropriate $w_0(x, t)$, n and h . Then, we have

$$w(x, t) = w_0(x, t) + \sum_{m=1}^{\infty} w_m(x, t) \left(\frac{1}{n}\right)^m. \tag{18}$$

If we differentiate the zeroth order deformation Eq. (14) m -times with respect to q and we divide by $m!$, respectively, then for $q = 0$, we acquire

$${}_cM_\alpha[w_m(x, t) - k_m w_{m-1}(x, t)] = hH^*(x, t)\mathcal{R}_m(\vec{w}_{m-1}), \tag{19}$$

where the vectors are described by

$$\vec{w}_m = \{w_0(x, t), w_1(x, t), \dots, w_m(x, t)\}. \tag{20}$$

Applying the inverse conformable fractional Mohand transform to Eq. (20), we get

$$w_m(x, t) = k_m w_{m-1}(x, t) + h({}_cM_\alpha)^{-1}[H^*(x, t)\mathcal{R}_m(\vec{w}_{m-1})], \tag{21}$$

where

$$\begin{aligned} \mathcal{R}_m(\vec{w}_{m-1}) = & {}_cM_\alpha[w_{m-1}(x, t)] - \left(1 - \frac{k_m}{n}\right)rw_0(x, t) + \frac{1}{r}{}_cM_\alpha[Aw_{m-1}(\rho_i x, \sigma_i t) \\ & + H_{m-1}(x, t) - f(x, t)], \end{aligned} \tag{22}$$

and

$$k_m = \begin{cases} 0, & m \leq 1, \\ n, & m > 1. \end{cases} \tag{23}$$

Here, H_m^* is homotopy polynomial and presented by

$$H_m^* = \frac{1}{m!} \frac{\partial^m \varphi(x, t; q)}{\partial q^m} \Big|_{q=0} \text{ and } \varphi(x, t; q) = \varphi_0 + q\varphi_1 + q^2\varphi_2 + \dots. \tag{24}$$

Using Eqs. (21) - (22), we get

$$w_m(x, t) = (k_m + h)w_{m-1}(x, t) - \left(1 - \frac{k_m}{n}\right)rw_0(x, t) + h({}_cM_\alpha)^{-1} \left[\left(\frac{1}{r}{}_cM_\alpha[Aw_{m-1}(\rho_i x, \sigma_i t) \right. \right.$$

$$+H_{m-1}(x, t) - f(x, t)]. \tag{25}$$

When Cq-MHATM is used, the series solution is given by

$$w(x, t) = \sum_{m=0}^{\infty} w_m(x, t) \left(\frac{1}{n}\right)^m. \tag{26}$$

2.1.2. Conformable Mohand Adomian decomposition method

We analyze the CTFNPDE with proportional delay in Eq. (10):

Applying the conformable fractional Mohand transform to Eq. (10) and using the initial condition, then we have

$$rR_{\alpha}(r) - r^2w(x, 0) + {}_cM_{\alpha}[Aw(\rho_i x, \sigma_i t) + Hw(\rho_i x, \sigma_i t)] = {}_cM_{\alpha}[f(x, t)]. \tag{27}$$

When Eq. (27) is rearranged, it is obtained as

$$r {}_cM_{\alpha}[w(x, t)] - rw(x, 0) + \frac{1}{r} {}_cM_{\alpha}[Aw(\rho_i x, \sigma_i t) + Hw(\rho_i x, \sigma_i t)] - \frac{1}{r} {}_cM_{\alpha}[f(x, t)] = 0. \tag{28}$$

When the inverse conformable fractional Mohand transform is implemented to both sides of Eq. (28), we have

$$w(x, t) = A(x, t) - ({}_cM_{\alpha})^{-1} \left\{ \frac{1}{r} {}_cM_{\alpha}[Aw(\rho_i x, \sigma_i t) + Hw(\rho_i x, \sigma_i t)] \right\}. \tag{29}$$

where the term $A(x, t)$ emerges from the in-homogeneous term and initial conditions. Now, assume that the infinite series solution is of the form:

$$w(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} w_n(x, t). \tag{30}$$

Now, by using Eqs. (29)-(30), we get

$$\sum_{n=0}^{\infty} w_n(x, t) = A(x, t) - ({}_cM_{\alpha})^{-1} \left\{ \frac{1}{r} {}_cM_{\alpha} \left[A \sum_{n=0}^{\infty} w_n(\rho_i x, \sigma_i t) + \sum_{n=0}^{\infty} B_n(w_n(\rho_i x, \sigma_i t)) \right] \right\}, \tag{31}$$

where $B_n(w_n)$ is Adomian polynomial and that denotes the nonlinear term $Hw(\rho_i x, \sigma_i t)$. By comparing both of sides of Eq. (31), we have

$$w_0(x, t) = A(x, t), \tag{32}$$

$$w_1(x, t) = -({}_cM_{\alpha})^{-1} \left\{ \frac{1}{r} {}_cM_{\alpha}[w_0(\rho_i x, \sigma_i t) + B_0] \right\}, \tag{33}$$

$$w_2(x, t) = -({}_cM_{\alpha})^{-1} \left\{ \frac{1}{r} {}_cM_{\alpha}[w_1(\rho_i x, \sigma_i t) + B_1] \right\}, \tag{34}$$

⋮

Similarly, we obtain the general recursive relation by

$$w_{n+1}(x, t) = -({}_cM_{\alpha})^{-1} \left\{ \frac{1}{r} {}_cM_{\alpha}[w_n(\rho_i x, \sigma_i t) + B_n] \right\}, m \geq 1. \tag{35}$$

Finally, the approximate solution $w(x, t)$ is given by

$$w(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} w_n(x, t). \tag{36}$$

3. Results

This section will provide illustrations of the conformable time-fractional generalized Burgers equation with proportional delay.

Example 3.1. [27, 30] Consider the conformable time-fractional generalized Burgers equation with proportional delay

$$\frac{\partial^\alpha w(x, t)}{\partial t^\alpha} = \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} + w\left(\frac{x}{2}, \frac{t}{2}\right) \frac{\partial w\left(x, \frac{t}{2}\right)}{\partial x} + \frac{1}{2} w(x, t), \tag{37}$$

where $x, t \in [0, 1], 0 < \alpha \leq 1$, subject to initial condition

$$w(x, 0) = x. \tag{38}$$

Case (i) Cq-MHATM solution

Implementing the conformable fractional Mohand transform to Eq. (37) and using Eq. (38), then we get

$${}_cM_\alpha[w(x, t)] = r w(x, 0) + \frac{1}{r} {}_cM_\alpha \left[\frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} + w\left(\frac{x}{2}, \frac{t}{2}\right) \frac{\partial w\left(x, \frac{t}{2}\right)}{\partial x} + \frac{1}{2} w(x, t) \right]. \tag{39}$$

We define the nonlinear operators by using Eq. (39), as

$$N[\varphi(x, t; q)] = {}_cM_\alpha[\varphi(x, t; q)] - r x - \frac{1}{r} {}_cM_\alpha \left[\frac{\partial^2 \varphi(x, t; q)}{\partial x^2} + \varphi\left(\frac{x}{2}, \frac{t}{2}; q\right) \frac{\partial \varphi(x, \frac{t}{2}; q)}{\partial x} + \frac{1}{2} \varphi\left(\frac{x}{2}, \frac{t}{2}; q\right) \right]. \tag{40}$$

When the suggested algorithm is applied, the $m - th$ order deformation equations are described by

$${}_cM_\alpha[w_m(x, t) - k_m w_{m-1}(x, t)] = h \mathcal{R}_m[\vec{w}_{m-1}], \tag{41}$$

where

$$\begin{aligned} \mathcal{R}_m[\vec{w}_{m-1}] = & {}_cM_\alpha[\vec{w}_{m-1}(x, t)] - \left(1 - \frac{k_m}{n}\right) r x - \frac{1}{r} {}_cM_\alpha \left[\frac{\partial^2 w_{m-1}(x, t; q)}{\partial x^2} + \sum_{r=0}^{m-1} w_r\left(\frac{x}{2}, \frac{t}{2}\right) \right. \\ & \left. \times \frac{\partial w_{1-r}\left(x, \frac{t}{2}\right)}{\partial x} + \frac{1}{2} w_{m-1}\left(\frac{x}{2}, \frac{t}{2}\right) \right]. \end{aligned} \tag{42}$$

On applying inverse conformable Mohand transform to Eq. (41), then we have

$$w_m(x, t) = k_m w_{m-1}(x, t) + h ({}_cM_\alpha)^{-1} \{ \mathcal{R}_m[\vec{w}_{m-1}] \}. \tag{43}$$

By the use of initial condition, then we get

$$w_0(x, t) = x. \tag{44}$$

To find the value of $w_1(x, t)$, putting $m = 1$ in Eq. (43), then we obtain

$$w_1(x, t) = -xh \frac{t^\alpha}{\alpha}. \tag{45}$$

In the same way, if we put $m = 2$ in Eq. (43), we can obtain the value of $w_2(x, t)$

$$w_2(x, t) = -(n + h) \left(hx \frac{t^\alpha}{\alpha} \right) + \left(\frac{5xh^2t^{2\alpha}}{82^\alpha\alpha^2} \right). \tag{46}$$

In this way, the other terms can be found. So, the Cq-MHATM solution of the equation is given by

$$w(x, t) = w_0(x, t) + \sum_{m=1}^{\infty} w_m(x, t) \left(\frac{1}{n} \right)^m. \tag{47}$$

If we put $\alpha = 1, n = 1, h = -1$ in Eq. (46), then the obtained results $\sum_{m=1}^M w_m(x, t) \left(\frac{1}{n} \right)^m$ converges to the exact solution $w(x, t) = xe^t$ of the equation when $M \rightarrow \infty$.

Case (ii) CMADM solution

Applying the conformable fractional Mohand transform to Eq. (37) and using Eq. (38), then we get

$${}_cM_\alpha[w(x, t)] = rw(x, 0) + \frac{1}{r} {}_cM_\alpha \left[\frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} + w \left(\frac{x}{2}, \frac{t}{2} \right) \frac{\partial w \left(x, \frac{t}{2} \right)}{\partial x} + \frac{1}{2} w(x, t) \right]. \tag{48}$$

Applying the inverse fractional Mohand transform to Eq (48), then we obtain

$$w(x, t) = x + ({}_cM_\alpha)^{-1} \left\{ \frac{1}{r} {}_cM_\alpha \left[\frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} + w \left(\frac{x}{2}, \frac{t}{2} \right) \frac{\partial w \left(x, \frac{t}{2} \right)}{\partial x} + \frac{1}{2} w(x, t) \right] \right\}. \tag{49}$$

Now, assume that the infinite series solution is of the form:

$$w(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} w_n(x, t). \tag{50}$$

Using the ADM procedure, then we obtain

$$w_0(x, t) = x, \tag{51}$$

$$w_{s+1}(x, t) = ({}_cM_\alpha)^{-1} \left[\frac{1}{r} {}_cM_\alpha \left[\frac{\partial^2 w_s(x, t)}{\partial x^2} + w_s \left(\frac{x}{2}, \frac{t}{2} \right) \frac{\partial w_s \left(x, \frac{t}{2} \right)}{\partial x} + \frac{1}{2} w_s(x, t) \right], s = 0, 1, 2, \dots \right] \tag{52}$$

For $s = 0$ in Eq. (52), we obtain

$$w_1(x, t) = ({}_cM_\alpha)^{-1} \left[\frac{1}{r} {}_cM_\alpha \left[\frac{\partial^2 w_0(x, t)}{\partial x^2} + w_0 \left(\frac{x}{2}, \frac{t}{2} \right) \frac{\partial w_0 \left(x, \frac{t}{2} \right)}{\partial x} + \frac{1}{2} w_0(x, t) \right] \right] \\ = x \frac{t^\alpha}{\alpha}, \tag{53}$$

For $s = 1$ in Eq. (52), we obtain

$$w_2(x, t) = -({}_cM_\alpha)^{-1} \left[\frac{1}{r} {}_cM_\alpha \left[\frac{\partial^2 w_1(x, t)}{\partial x^2} + w_0\left(\frac{x}{2}, \frac{t}{2}\right) \frac{\partial w_1\left(x, \frac{t}{2}\right)}{\partial x} + w_1\left(\frac{x}{2}, \frac{t}{2}\right) \frac{\partial w_0\left(x, \frac{t}{2}\right)}{\partial x} + \frac{1}{2} w_1(x, t) \right] \right] = \frac{5xh^2t^{2\alpha}}{82^\alpha \alpha^2}. \tag{54}$$

As a result, we obtain

$$w(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} w_n(x, t) = w_0(x, t) + w_1(x, t) + w_2(x, t) + \dots = x + x \frac{t^\alpha}{\alpha} + \frac{5xh^2t^{2\alpha}}{82^\alpha \alpha^2} + \dots \tag{55}$$

Substituting $\alpha = 1$ in Eq. (55), then CMADM solution is reduced as

$$w(x, t) = x \left[1 + t + \frac{5t^2}{8.2!} + \dots \right]. \tag{57}$$

This result converges to the exact solution in a closed form:

$$w(x, t) = xe^t. \tag{58}$$

Figure 1 shows the graphs of Cq-MHATM, exact solution and absolute error.

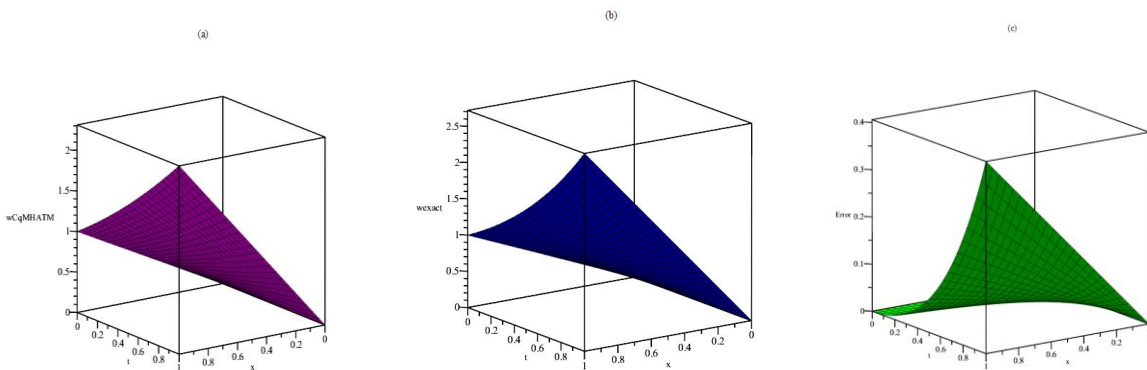


Figure 1. (a) Nature of Cq-MHATM solution **(b)** Nature of exact solution **(c)** Nature of absolute error= $|w_{exact} - w_{Cq-MHATM}|$ at $h = -1, n = 1, \alpha = 1$.

The 3D graphs of CMADM, exact solution, and absolute error are depicted in Figure 2.

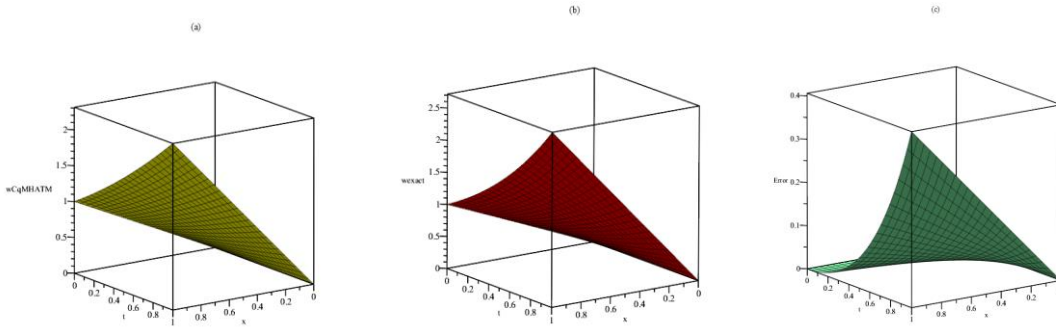


Figure 2. (a) Nature of CqMADM solution (b) Nature of exact solution (c) Nature of absolute error= $|w_{exact} - w_{CMADM}|$ at $\alpha = 1$.

Figure 3 depicts comparison plots of Cq-MHATM, CMADM, and exact solutions for distinct α values.

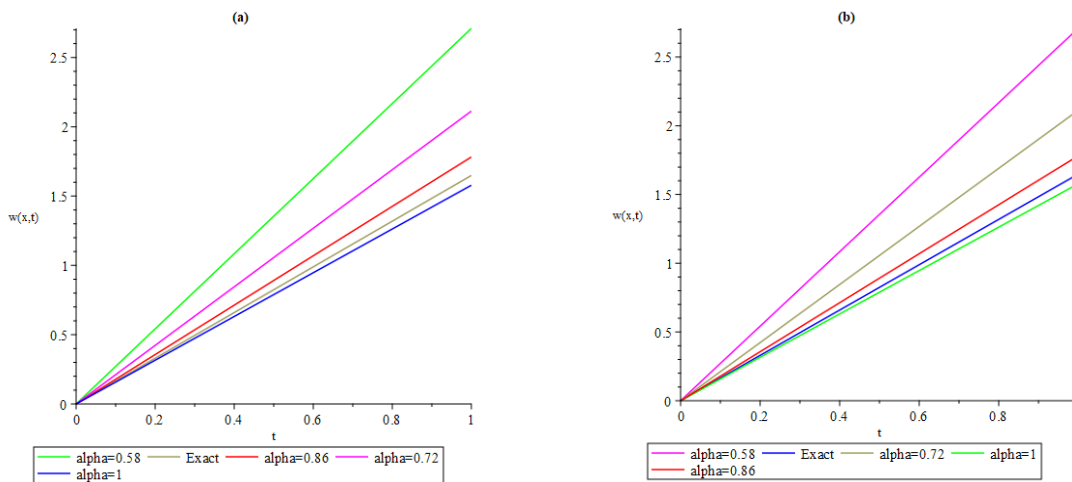


Figure 3. The comparison of the Cq-MHATM solutions and exact solution (b) The comparison of the CMADM solutions and exact solution at $h = -1, n = 1, t = 0.5$ with different α .

A comparison of the absolute error between Cq-MHATM, CMADM and HPM [27] for Eq. (37) with $\alpha = 1$ is presented in Table 1.

Table 1. Comparison of absolute error between Cq-MHATM, CMADM, and HPM [27] for Eq. (37) with $\alpha = 1$.

x		t			
		0.025	0.050	0.075	0.1
Cq-MHATM	0.25	1.0×10^{-9}	1.6×10^{-8}	8.1×10^{-8}	2.5×10^{-7}
CMADM		1.0×10^{-9}	1.6×10^{-8}	8.1×10^{-8}	2.5×10^{-7}
HPM		1.0×10^{-9}	1.6×10^{-8}	8.1×10^{-8}	2.5×10^{-7}
Cq-MHATM	0.50	4.0×10^{-9}	6.4×10^{-6}	3.2×10^{-7}	1.0×10^{-6}
CMADM		4.0×10^{-9}	6.4×10^{-6}	3.2×10^{-7}	1.0×10^{-6}
HPM		4.0×10^{-9}	6.4×10^{-6}	3.2×10^{-7}	1.0×10^{-6}
Cq-MHATM	0.75	9.1×10^{-9}	1.4×10^{-7}	7.3×10^{-7}	2.2×10^{-6}
CMADM		9.1×10^{-9}	1.4×10^{-7}	7.3×10^{-7}	2.2×10^{-6}
HPM		9.1×10^{-9}	1.4×10^{-7}	7.3×10^{-7}	2.2×10^{-6}

Example 3.2. [27, 30] Consider the conformable time-fractional generalized Burgers equation with proportional delay

$$\frac{\partial^\alpha w(x, t)}{\partial t^\alpha} = \frac{\partial^2 w\left(\frac{x}{2}, \frac{t}{2}\right)}{\partial x^2} \frac{\partial w\left(\frac{x}{2}, \frac{t}{2}\right)}{\partial x} - \frac{1}{8} \frac{\partial w(x, t)}{\partial x} - w(x, t), \tag{59}$$

where $x, t \in [0,1], 0 < \alpha \leq 1$, subject to initial condition

$$w(x, 0) = x^2. \tag{60}$$

Case (i) Cq-MHATM solution

Implementing the conformable fractional Mohand transform to Eq. (59) and using Eq. (60), then we get

$${}_cM_\alpha[w(x, t)] = r w(x, 0) - \frac{1}{r} {}_cM_\alpha \left[\frac{\partial^2 w \left(\frac{x}{2}, \frac{t}{2} \right)}{\partial x^2} \frac{\partial w \left(\frac{x}{2}, \frac{t}{2} \right)}{\partial x} - \frac{1}{8} \frac{\partial w(x, t)}{\partial x} - w(x, t) \right]. \tag{61}$$

We define the nonlinear operators by using Eq. (61), as

$$N[\varphi(x, t; q)] = {}_cM_\alpha[\varphi(x, t; q)] - r x^2 - \frac{1}{r} {}_cM_\alpha \left[\frac{\partial^2 w \left(\frac{x}{2}, \frac{t}{2} \right)}{\partial x^2} \frac{\partial w \left(\frac{x}{2}, \frac{t}{2} \right)}{\partial x} - \frac{1}{8} \frac{\partial w(x, t)}{\partial x} - w(x, t) \right]. \tag{62}$$

By applying the suggested algorithm, the $m - th$ order deformation equations are described by

$${}_cM_\alpha[w_m(x, t) - k_m w_{m-1}(x, t)] = h \mathcal{R}_m[\bar{w}_{m-1}], \tag{63}$$

where

$$\mathcal{R}_m[\bar{w}_{m-1}] = {}_cM_\alpha[\bar{w}_{m-1}(x, t)] - \left(1 - \frac{k_m}{n} \right) r x^2 - \frac{1}{r} {}_cM_\alpha \left[\sum_{r=0}^{m-1} \frac{\partial^2 w_r \left(\frac{x}{2}, \frac{t}{2} \right)}{\partial x^2} \frac{\partial w_{1-r} \left(\frac{x}{2}, \frac{t}{2} \right)}{\partial x} - \frac{1}{8} \frac{\partial w_{m-1}(x, t)}{\partial x} - w_{m-1}(x, t) \right]. \tag{64}$$

On applying inverse conformable fractional Mohand transform to Eq. (63), then we have

$$w_m(x, t) = k_m w_{m-1}(x, t) + h ({}_cM_\alpha)^{-1} \{ \mathcal{R}_m[\bar{w}_{m-1}] \}. \tag{65}$$

By the use of initial condition, then we get

$$w_0(x, t) = x^2. \tag{66}$$

To find the value of $w_1(x, t)$, putting $m = 1$ in Eq. (65), then we obtain

$$w_1(x, t) = h x^2 \frac{t^\alpha}{\alpha}. \tag{67}$$

In the same way, if we put $m = 2$ in Eq. (65), we can obtain the value of $w_2(x, t)$

$$w_2(x, t) = (n + h) \left(h x^2 \frac{t^\alpha}{\alpha} \right) - h^2 \left(\frac{x}{2^{\alpha+1}} - \frac{x}{4} - x^2 \right) \frac{t^{2\alpha}}{2\alpha^2}. \tag{68}$$

In this way, the other terms can be found. So, the Cq-MHATM solution of the equation is given by

$$w(x, t) = w_0(x, t) + \sum_{m=1}^{\infty} w_m(x, t) \left(\frac{1}{n} \right)^m. \tag{69}$$

If we put $\alpha = 1, n = 1, h = -1$ in Eq. (68), then the obtained results $\sum_{m=1}^M w_m(x, t) \left(\frac{1}{n} \right)^m$ converges to the exact solution $w(x, t) = x^2 e^{-t}$ of the equation when $M \rightarrow \infty$.

Case (ii) CMADM solution

Applying the conformable fractional Mohand transform to Eq. (59) and using Eq. (60), then we get

$${}_cM_\alpha[w(x, t)] = rw(x, 0) - \frac{1}{r} {}_cM_\alpha \left[\frac{\partial^2 w \left(\frac{x}{2}, \frac{t}{2} \right)}{\partial x^2} \frac{\partial w \left(\frac{x}{2}, \frac{t}{2} \right)}{\partial x} - \frac{1}{8} \frac{\partial w(x, t)}{\partial x} - w(x, t) \right]. \tag{70}$$

Applying the inverse fractional Mohand transform to Eq (70), then we obtain

$$w(x, t) = x^2 - ({}_cM_\alpha)^{-1} \left\{ \frac{1}{r} {}_cM_\alpha \left[\frac{\partial^2 w \left(\frac{x}{2}, \frac{t}{2} \right)}{\partial x^2} \frac{\partial w \left(\frac{x}{2}, \frac{t}{2} \right)}{\partial x} - \frac{1}{8} \frac{\partial w(x, t)}{\partial x} - w(x, t) \right] \right\}. \tag{71}$$

Now, assume that the infinite series solution is of the form:

$$w(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} w_n(x, t). \tag{72}$$

Using the ADM procedure, then we obtain

$$w_0(x, t) = x^2, \tag{73}$$

$$w_{s+1}(x, t) = -({}_cM_\alpha)^{-1} \left[\frac{1}{r} {}_cM_\alpha \left[\frac{\partial^2 w_s \left(\frac{x}{2}, \frac{t}{2} \right)}{\partial x^2} \frac{\partial w_s \left(\frac{x}{2}, \frac{t}{2} \right)}{\partial x} - \frac{1}{8} \frac{\partial w_s(x, t)}{\partial x} - w_s(x, t) \right] \right], s = 0, 1, 2, \dots \tag{74}$$

For $s = 0$ in Eq. (74), we obtain

$$\begin{aligned} w_1(x, t) &= -({}_cM_\alpha)^{-1} \left[\frac{1}{r} {}_cM_\alpha \left[\frac{\partial^2 w_0 \left(\frac{x}{2}, \frac{t}{2} \right)}{\partial x^2} \frac{\partial w_0 \left(\frac{x}{2}, \frac{t}{2} \right)}{\partial x} - \frac{1}{8} \frac{\partial w_0(x, t)}{\partial x} - w_0(x, t) \right] \right] \\ &= -x^2 \frac{t^\alpha}{\alpha}. \end{aligned} \tag{75}$$

For $s = 1$ in Eq. (74), we obtain

$$\begin{aligned} w_2(x, t) &= -({}_cM_\alpha)^{-1} \left[\frac{1}{r} {}_cM_\alpha \left[\frac{\partial^2 w_1 \left(\frac{x}{2}, \frac{t}{2} \right)}{\partial x^2} \frac{\partial w_1 \left(\frac{x}{2}, \frac{t}{2} \right)}{\partial x} - \frac{1}{8} \frac{\partial w_1(x, t)}{\partial x} - w_1(x, t) \right] \right] \\ &= -\left(\frac{x}{2^{\alpha+1}} - \frac{x}{4} - x^2 \right) \frac{t^{2\alpha}}{2\alpha^2}. \end{aligned} \tag{76}$$

As a result, we obtain

$$\begin{aligned} w(x, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} w_n(x, t) = w_0(x, t) + w_1(x, t) + w_2(x, t) + \dots \\ &= x^2 - x^2 \frac{t^\alpha}{\alpha} - \left(\frac{x}{2.2^\alpha} - \frac{x}{4} - x^2 \right) \frac{t^{2\alpha}}{2\alpha^2} + \dots \end{aligned} \tag{77}$$

Substituting $\alpha = 1$ in Eq. (78), then CMADM solution is reduced as

$$w(x, t) = x^2 \left[1 - t + \frac{t^2}{2!} - \dots \right]. \tag{78}$$

This result converges to the exact solution in a closed form:

$$w(x, t) = x^2 e^{-t}. \tag{79}$$

Figure 4 shows the graphs of Cq-MHATM, exact solution and absolute error.

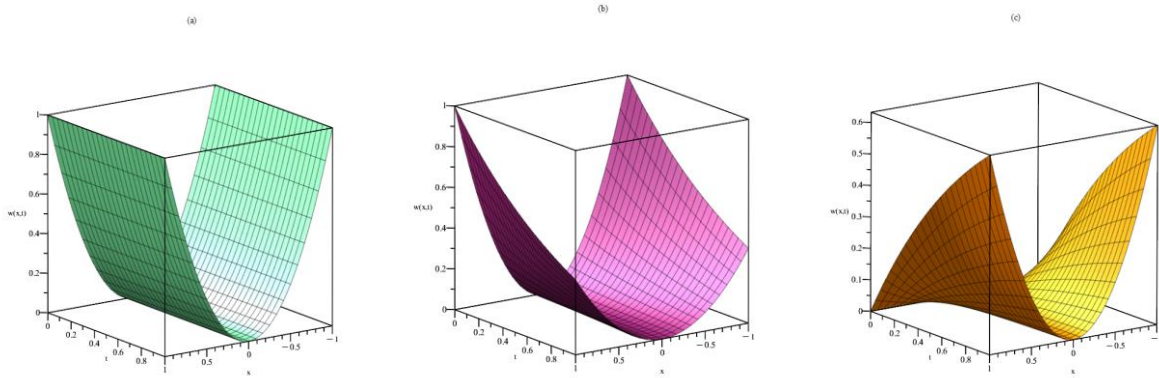


Figure 4. (a) Nature of Cq-MHATM solution (b) Nature of exact solution (c) Nature of absolute error= $|w_{exact} - w_{Cq-MHATM}|$ at $h = -1, n = 1, \alpha = 1$.

The graphs of CMADM, exact solution, and absolute error are depicted in Figure 5.

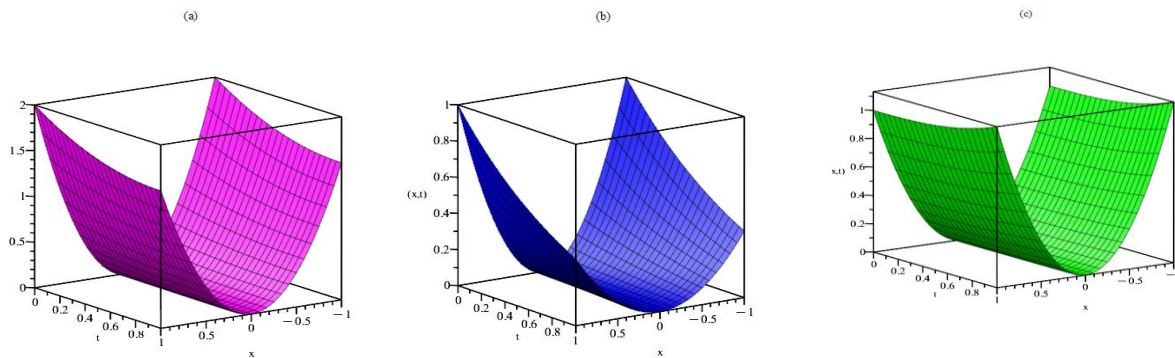


Figure 5. (a) Nature of CMADM solution (b) Nature of exact solution (c) Nature of absolute error= $|w_{exact} - w_{CMADM}|$ at $\alpha = 1$.

Figure 6 depicts comparison plots of Cq-MHATM, CMADM, and exact solutions for distinct α values.

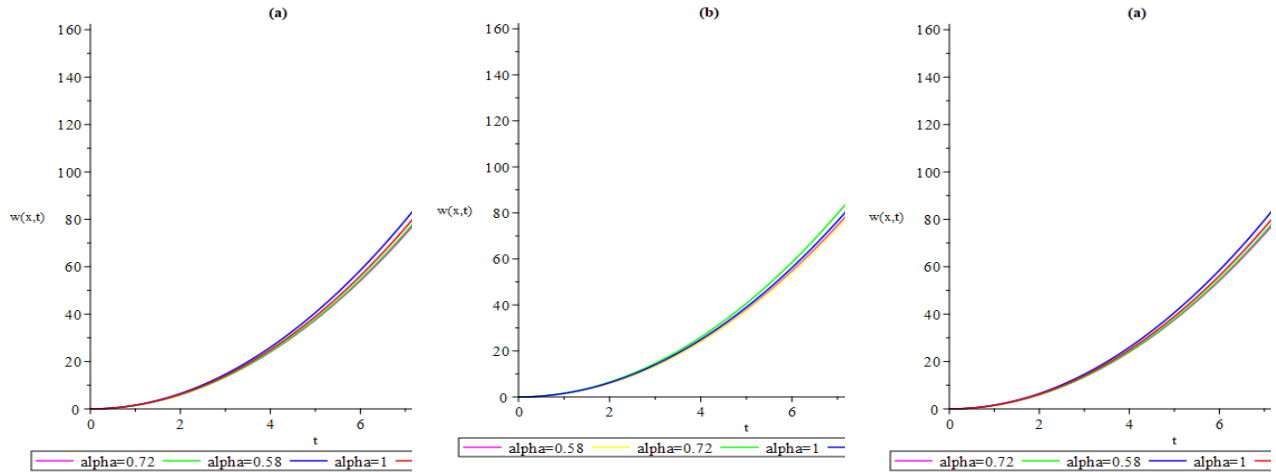


Figure 6. The comparison of the Cq-MHATM solutions and exact solution (b) The comparison of the CMADM solutions and exact solution at $h = -1, n = 1, t = 0.5$ with different α .

Table 2 presents a comparison of the absolute error for Eq. (59) with $\alpha = 1$ between Cq-MHATM, CMADM, and HPM [27].

Table 2. Comparison of absolute error between Cq-MHATM, CMADM, and HPM [27] for Eq. (59) with $\alpha = 1$.

x		t			
		0.025	0.050	0.075	0.1
Cq-MHATM	0.25	1.6×10^{-7}	1.2×10^{-6}	4.3×10^{-6}	1.0×10^{-5}
		1.6×10^{-7}	1.2×10^{-6}	4.3×10^{-6}	1.0×10^{-5}
		1.6×10^{-7}	1.2×10^{-6}	4.3×10^{-6}	1.0×10^{-5}
Cq-MHATM	0.50	6.4×10^{-7}	5.1×10^{-6}	1.7×10^{-5}	4.0×10^{-5}
		6.4×10^{-7}	5.1×10^{-6}	1.7×10^{-5}	4.0×10^{-5}
		6.4×10^{-7}	5.1×10^{-6}	1.7×10^{-5}	4.0×10^{-5}
Cq-MHATM	0.75	1.4×10^{-6}	1.1×10^{-5}	3.8×10^{-5}	9.1×10^{-5}
		1.4×10^{-6}	1.1×10^{-5}	3.8×10^{-5}	9.1×10^{-5}
		1.4×10^{-6}	1.1×10^{-5}	3.8×10^{-5}	9.1×10^{-5}

4. Discussion and Conclusion

Table 1 evaluates the absolute error comparison between Cq-HATM, CSHPM, and HPM for Eq. (37) with $\alpha = 1$ for the nonlinear conformable time-fractional generalized Burgers equation (CTFGBE) with proportional delay. The 3D graphs of Cq-MHATM, exact solution, and absolute error are depicted in Figure 1. Figure 2 depicts 3D graphs of CMADM, exact solution, and absolute error. Figure 3 depicts a comparison of Cq-MHATM, CMADM, and exact solutions in 2D plots for various α values. Table 2 presents an assessment of the absolute error comparison among Cq-HATM, CSHPM, and HPM methods for Eq. (59) with $\alpha = 1$, applied to the nonlinear conformable time-fractional generalized Burgers equation (CTFGBE) with proportional delay. Figure 4 illustrates the three-dimensional plots of Cq-MHATM, the exact solution, and the absolute error. The graphical representation in Figure 5 illustrates three-dimensional graphs of the CMADM, the exact solution, and the absolute error. The 2D plots in Figure 6 present a comparison of the solutions for Cq-MHATM, CMADM, and exact solution with respect to various α values. The study found that the techniques presented in Tables 1-2 produced equivalent results to those obtained through the use of HPM. The results indicate that the techniques presented in Table 6 produced equivalent results to those obtained through the use of HPM.

This study investigates the behavior of CTFGBE with proportional delay using Cq-MHATM and CMADM. Furthermore, the MAPLE software has been utilized to produce 2D and 3D graphs that depict the solutions to Eqs. (37)-(59) for diverse values of α . Variations in the construction of the surface graphs for Eqs. (37)-(59) have been observed. Variations in the construction of the surface for Eqs. (37)-(59) have been noted. The research revealed that the methodologies illustrated in Tables 1-2 yielded outcomes that were comparable to those achieved by employing HPM, with t as the independent variable and x held constant.

The efficacy and benefits of the newly developed approach for addressing nonlinear conformable TFPDEs with proportional delay have been noted.

References

- [1] Miller, K. S., Ross, B. 1993. An introduction to the fractional calculus and fractional differential equations, Wiley, New York, 376 p.
- [2] Podlubny, I. 1999. Fractional differential equations, mathematics in science and engineering, Academic Press, New York, 365 p.
- [3] Baleanu, D., Diethelm, K., Scalas, E., Trujillo, J. J. 2012. *Fractional calculus: models and numerical methods*, World Scientific, London, 476 p.
- [4] Povstenko, Y. 2015. Linear fractional diffusion-wave equation for scientists and engineers. Birkhäuser, Switzerland, 460 p.
- [5] Ala, V. 2022. New exact solutions of space-time fractional Schrödinger-Hirota equation. Bulletin of the Karaganda university Mathematics series, 107(3), 17-24.
- [6] Ala, V. 2023. Exact Solutions of Nonlinear Time Fractional Schrödinger Equation with Beta- Derivative. Fundamentals of Contemporary Mathematical Sciences, 4(1), 1-8.
- [7] Baleanu, D., Wu, G. C., Zeng, S. D. 2017. Chaos analysis and asymptotic stability of generalized Caputo fractional differential equations. Chaos, Solitons & Fractals, 102, 99-105.
- [8] Sweilam, N. H., Abou Hasan, M. M., Baleanu, D. 2017. New studies for general fractional financial models of awareness and trial advertising decisions. Chaos, Solitons & Fractals, 104, 772-784.
- [9] Liu, D. Y., Gibaru, O., Perruquetti, W., Laleg-Kirati, T. M. 2015. Fractional order differentiation by integration and error analysis in noisy environment. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 60(11), 2945-2960.
- [10] Esen, A., Sulaiman, T. A., Bulut, H., Baskonus, H. M. 2018. Optical solitons to the space-time fractional (1+1)-dimensional coupled nonlinear Schrödinger equation. *Optik*, 167, 150-156.
- [11] Veerasha, P., Prakasha, D. G., Baskonus, H. M. 2019. Novel simulations to the time-fractional Fisher's equation. *Mathematical Sciences*, 13(1), 33-42.
- [12] Veerasha, P., Prakasha, D. G., Baskonus, H. M. 2019. New numerical surfaces to the mathematical model of cancer chemotherapy effect in Caputo fractional derivatives. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 29(1), 013119.
- [13] Caponetto, R., Dongola, G., Fortuna, L., Gallo, A. 2010. New results on the synthesis of FO-PID controllers. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 15(4), 997-1007.
- [14] Prakash, A., Veerasha, P., Prakasha, D. G., Goyal, M. 2019. A homotopy technique for a fractional order multi-dimensional telegraph equation via the Laplace transform. *The European Physical Journal Plus*, 134, 1-18.
- [15] Mohand, M., Mahgoub, A. 2017. The new integral transform "Mohand Transform". *Advances in Theoretical and Applied Mathematics*, 12(2), 113-120.
- [16] Aggarwal, S., Sharma, N., Chauhan, R. 2018. Solution of linear Volterra integral equations of second kind using Mohand transform. *International Journal of Research in Advent Technology*, 6(11), 3098-3102.

- [17] Aggarwal, S., Gupta, A. R., Singh, D. P., Asthana, N., Kumar, N. 2018. Application of Laplace transform for solving population growth and decay problems. *International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science*, 7(9), 141-145.
- [18] Sathya, S., Rajeswari, I. 2018. Applications of Mohand transform for solving linear partial integro-differential equations. *International Journal of Research in Advent Technology*, 6(10), 2841-2843.
- [19] Kumar, P. S., Gomathi, P., Gowri, S., Viswanathan, A. 2018. Applications of Mohand transform to mechanics and electrical circuit problems. *International Journal of Research in Advent Technology*, 6(10), 2838-2840.
- [20] Kumar, P. S., Saranya, C., Gnanavel, M. G., Viswanathan, A. 2018. Applications of Mohand transform for solving linear Volterra integral equations of first kind. *International Journal of Research in Advent Technology*, 6(10), 2786-2789.
- [21] Zubik-Kowal, B. 2000. Chebyshev pseudospectral method and waveform relaxation for differential and differential-functional parabolic equations. *Applied numerical mathematics*, 34(2-3), 309-328.
- [22] Alkan, A. 2022. Improving Homotopy Analysis Method with An Optimal Parameter for Time-Fractional Burgers Equation. *Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 4(2), 117-134.
- [23] Jackiewicz, Z., Zubik-Kowal, B. 2006. Spectral collocation and waveform relaxation methods for nonlinear delay partial differential equations. *Applied Numerical Mathematics*, 56(3-4), 433-443.
- [24] Mead, J., Zubik-Kowal, B. 2005. An iterated pseudospectral method for delay partial differential equations. *Applied numerical mathematics*, 55(2), 227-250.
- [25] Abazari, R., Ganji, M. 2011. Extended two-dimensional DTM and its application on nonlinear PDEs with proportional delay. *International Journal of Computer Mathematics*, 88(8), 1749-1762.
- [26] Abazari, R., Kilicman, A. 2014. Application of differential transform method on nonlinear integro-differential equations with proportional delay. *Neural Computing and Applications*, 24, 391-397.
- [27] Tanthanuch, J. 2012. Symmetry analysis of the nonhomogeneous inviscid Burgers equation with delay. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 17(12), 4978-4987.
- [28] Sakar, M. G., Uludag, F., Erdogan, F. 2016. Numerical solution of time-fractional nonlinear PDEs with proportional delays by homotopy perturbation method. *Applied Mathematical Modelling*, 40(13-14), 6639-6649.
- [29] Biazar, J., Ghanbari, B. 2012. The homotopy perturbation method for solving neutral functional-differential equations with proportional delays. *Journal of King Saud University-Science*, 24(1), 33-37.
- [30] Chen, X., Wang, L. 2010. The variational iteration method for solving a neutral functional-differential equation with proportional delays. *Computers & Mathematics with Applications*, 59(8), 2696-2702.
- [31] Singh, B. K., Kumar, P. Fractional variational iteration method for solving fractional partial differential equations with proportional delay. *International journal of differential equations*, 2017, 2017.
- [32] Khalil, R., Al Horani, M., Yousef, A., Sababheh, M. 2014. A new definition of fractional derivative. *Journal of computational and applied mathematics*, 264, 65-70.
- [33] Abdeljawad, T. 2015. On conformable fractional calculus. *Journal of computational and Applied Mathematics*, 279, 57-66.
- [34] Ala, V., Demirbilek, U., Mamedov, K. R. 2020. An application of improved Bernoulli sub-equation function method to the nonlinear conformable time-fractional SRLW equation. *AIMS Mathematics*, 5(4), 3751-3761.
- [35] Gözütok, U., Çoban, H., Sağıroğlu, Y. 2019. Frenet frame with respect to conformable derivative. *Filomat*, 33(6), 1541-1550.

Characterizations of Polypropylene Pile Fiber in Three-Dimensional (3D) Carpet under Flexure and Static Loading

Gulhan Erdogan Guler*¹, Sinem Yucel²

*¹ Department of Textile Engineering, Faculty of Engineering, Erciyes University, Talas/KAYSERİ
² Uniteks Tekstil, Atatürk Organize Sanayi Bölgesi, 10039 sokak, No. 26, 35620 Çiğli/İZMİR

(Alınış / Received: 17.07.2023, Kabul / Accepted: 25.07.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 31.08.2023)

Keywords

3D carpet,
Polypropylene fiber,
Flexure,
Static loading,
Pile density.

Abstract: Polypropylene fiber was used as the pile yarn in the construction of three-dimensional woven carpet structures. The properties of the developed polypropylene carpets were investigated under both flexure and compression loading conditions. The flexure rigidity and curvature of dry and wet polypropylene pile fiber carpets were found to be influenced by factors such as pile height and pile density, with indirect effects observed on weft density. Furthermore, it was identified that the average dry bending rigidity of the carpet exceeded the average wet bending rigidity by a factor of 2.06 in the case of the apparel fabric test and 6.10 in the case of the technical fabric test. The thickness loss (%) in different polypropylene carpets exhibited a proportional relationship with the pile density. The thickness experienced a decrease with increasing pile density, primarily due to the enhanced compression load carrying capacity of each polypropylene fiber knot. This effect was more pronounced in carpets with denser knots compared to those with sparser knots per unit area. Finding from the study can be useful for the polypropylene carpet designers in particular complex curvature part manufacturing.

Üç Boyutlu (3B) Polipropilen Havlı Halıların Eğme ve Basma Yükü Altında Karakterizasyonu

Anahtar Kelimeler

3B halı,
Polipropilen lif,
Eğme,
Statik yükleme,
Hav yoğunluğu.

Öz: Üç boyutlu dokuma halı yapılarının yapısında hav ipliği olarak polipropilen lifler kullanılmıştır. Geliştirilen polipropilen halıların özellikleri hem eğme hem de basma yükü altında incelenmiştir. Kuru ve ıslak polipropilen havlı halıların eğilme rijitliği ve eğim eğrilerinin, atkı sıklığından kaynaklanan dolaylı etkilerle birlikte hav yüksekliği ve hav yoğunluğu gibi faktörlerden etkilendiği tespit edilmiştir. Ayrıca, geleneksel kumaş testinde kuru halıların ortalama eğilme rijitliği değerlerinin, ıslak halıların ortalama eğilme rijitliği değerlerine kıyasla 2.06 kat, teknik kumaş testinde ise 6.10 kat daha fazla olduğu görülmüştür. Farklı polipropilen halılardaki kalınlık kaybı (%) hav yoğunluğu ile orantılı bir ilişki göstermiştir. Hav yoğunluğunun artması ile birlikte polipropilen lif düğümlerinin de artması ve her bir polipropilen lif düğümünün taşıyabileceği basma yükü kapasitesinin değişmesinden dolayı halıların kalınlıklarında azalma olduğu görülmüştür. Bu durum, birim alanda daha seyrek düğüm bulunan halılara göre daha yoğun düğümlü halılarda daha belirgin olarak gözlenmiştir. Çalışmadan elde edilen bulguların, özellikle karmaşık eğimli parça imalatında polipropilen halı tasarımcıları için faydalı olabileceği düşünülmektedir.

*Corresponding Author, email: gerdogan@erciyes.edu.tr

1. Introduction

Polypropylene carpet can be seen as a 3D structure since it utilizes three yarn sets, including interlaced warp and straight warp (stuffer) for the substrate, filling (interlaced or chain), and pile yarn (Z-yarn). The 3D carpet structure is named after 3D preform structures used in composite applications, where three yarn sets (warp, filling, and z-yarn) are interlaced orthogonally, similar to the analogy.

The face-to-face carpet structure [1] is one of the fundamental types of carpets produced. Carpet is a highly popular flooring option used extensively in both residential and commercial spaces due to its exceptional comfort, thermal insulation, soundproofing, and aesthetic qualities. Different types of natural fibers, such as wool (protein-based), cotton (cellulose-based), as well as synthetic fibers like polyester, polypropylene, acrylic, and nylon, either individually or in combination, can be employed as pile yarns in carpets [2]. Conversely, for the warp and weft yarns in the 3D carpet substrate, cotton, jute, or a blend of natural fibers is commonly utilized [3].

Polypropylene fibers (PP) are a type of thermoplastic polymer widely employed in fiber production [4]. These fibers consist of both crystalline and non-crystalline regions, which contribute to their highly anisotropic microfibrillar structures, resulting in anisotropic fiber properties [5]. One notable characteristic of polypropylene is its low density, with a value of 0.91 g/cm^3 . Moreover, polypropylene is known for its moisture resistance, as it does not absorb moisture and exhibits low moisture regain. PP fibers are highly resistant to a wide range of acids and alkalis, making them durable against stains and microorganisms. However, it is important to note that they have relatively low thermal conductivity and melting temperature. Additionally, when compared to polyester and polyamide (nylon), PP fibers exhibit poorer resilience because of having anisotropic microstructure [6]. Polypropylene is commonly utilized in the form of continuous or staple yarns, which can be twisted or crimped, depending on the desired application [4]. These yarn forms find extensive use in various textile industries, including apparel manufacturing and the production of interior floor coverings such as carpets.

Research conducted on carpets generally focuses on two main objectives: designing carpets for specific end-uses and providing guidance for the selection of appropriate structural and processing parameters [7-10]. Additionally, it is crucial to characterize polypropylene carpets in order to understand their physical, mechanical-thermal, acoustic, appearance retention, and durability properties throughout their service life [11-17]. For example, studies have been conducted to investigate the comfort of polypropylene carpets during standing and walking, taking into account complex biomechanical and psychophysical factors. These findings can contribute to the design of more comfortable carpets, particularly for residential applications [18,19]. Furthermore, observations have shown that the pile length and density of polypropylene face-to-face carpets significantly impact their thermal conductivity and sound absorption properties. Shorter pile lengths and denser loops have been found to enhance sound absorption capabilities [20,21]. These insights are valuable for optimizing the design and performance of polypropylene carpets in terms of their thermal and acoustic characteristics.

The flexure behaviour of textile yarns and fabrics, with a specific focus on polymer-based polypropylene fibers, has been the subject of investigation by several researchers [22-29]. By examining the flexural properties of polypropylene fibers, researchers seek to enhance the performance and comfort of textile materials in various end-uses, ensuring their suitability for applications that involve flexure. These investigations contribute to the development of fabric designs that exhibit improved flexibility, durability, and overall mechanical behaviour. The bending rigidity of the yarn was determined by considering the tensile modulus of its fibers, as well as yarn geometry and structural parameters. According to reports, the yarn's bending rigidity decreases with an increase in the surface helix angle of the yarn and the ratio of tensile to shear modulus of the fibers [30]. The bending rigidity of a single layer fabric is influenced by fabric density and crimp ratio, while the flexural rigidities of multi-layered structures depend on the number of fabric layers [31]. In the case of carpets, stiffness, as measured by flexural length, is an important parameter affected by various factors such as carpet construction, pile density, pile fiber properties (including fiber type), number of plies, and the number of twist. Notably, the flexural length of the carpet in both the warp and weft directions shows a significant decrease after washing [32].

When subjected to a static compression load, the carpet structure exhibits three distinct stages of deformation. The first stage involves flexural deformation, where the carpet undergoes bending due to the applied load. In the second stage, known as mixed deformation, a combination of bending and compressive deformations occurs, affecting different regions of the carpet structure. Finally, in the third stage, referred to as compressive deformation, all the fiber piles within the loading zone experience compression due to the applied loads. These stages of deformation have been observed and studied in carpet structures under static compression loads [33,34]. The impact of structural parameters on face-to-face cut pile carpets under static compression load was investigated, revealing the influence of pile density and pile height on the carpet's elastic and unrecovered deformation properties during static loading [35-37]. The elastic deformation, particularly in polymeric fibers, was observed to be dependent on pile density. On the other hand, when the pile height was low, the unrecovered

deformation was primarily associated with pile density [38]. Experimental findings indicate that carpets with a high pile height (16 mm) and high density (3120 piles/dm²) demonstrated excellent texture retention following static compression loads [39].

The toughness of carpets was found to be significantly influenced by two main factors: pile compression resistance and pile interlacement with the substrate. Pile interlacement, which can be described as the degree of interlocking between yarn sets, plays a crucial role in determining the overall toughness of the carpet. It encompasses multiple aspects, including pile pull-out resistance, friction between yarn sets, and the cohesion among individual fibers [40]. The pile compression resistance, or the carpet's ability to withstand compressive forces, directly impacts its toughness. Higher pile compression resistance contributes to enhanced toughness, as it allows the carpet to better withstand external pressures without significant deformation. Furthermore, the interlacement between the piles and the substrate is instrumental in defining the overall toughness. Effective interlacement increases the resistance to pile displacement, reinforcing the structure and improving its ability to endure stress. The interplay between factors such as pile pull-out resistance, friction between yarn sets, and fiber-to-fiber cohesion is critical for achieving optimal pile densities. These elements collectively contribute to the overall resilience of the carpet, ensuring its ability to withstand daily traffic patterns and maintain its structural integrity over time. By understanding and optimizing pile density, carpet manufacturers can enhance the properties of their products, resulting in carpets that exhibit superior durability and performance. The recovery properties of acrylic polymer carpets were examined following exposure to ultraviolet (UV) radiation. The investigation revealed a substantial increase in thickness loss as a direct consequence of the UV exposure [41].

A new theoretical approach was introduced to analyse the compression behaviour of cut-pile carpets, based on the concept of elastic-stored bending energy. The investigation indicated that the total energy associated with pile deformation depended on various factors, including the geometric and mechanical properties of the yarn and the magnitude of the applied compressive load [42,43]. A viscoelastic model, utilizing nonlinear three-element models, was employed to analyse the recovery of carpets following static compression loads. The investigation revealed that the recovery properties of polyester cut pile yarns could be effectively explained by considering plastic deformation in the form of creep, with the model also accounting for residual deformation [44,45].

The aim of this study was to experimentally assess the static loading and flexural rigidity properties of woven carpet structures made from polypropylene fibers. The findings would provide valuable insights for enhancing the design of carpet structures.

2. Materials and Methods

2.1. Carpet structure

Polypropylene carpet samples were obtained from Gumussuyu Halı Inc., a subsidiary of Erciyes Anadolu Holding, located in Kayseri, Turkey. The carpets were manufactured using the wilton face-to-face carpet weaving principle on a Van De Wiele carpet loom equipped with three rapiers [46]. The carpet designs were created using Weaving and Booria software programs that were compatible with the loom. Two types of carpet samples were produced, namely 2/2V and 1+2/3V weave constructions [46, 47]. Both polypropylene woven carpet structures consist of non-interlaced stuffer and interlaced warp, with the warp yarn being an 80/20% polyester/cotton blend, the weft yarn being 100% jute, and the colour pile yarns being 100% polypropylene. The specifications of the fiber, yarn, and substrate properties of the carpet are detailed in Table 1.

Three carpet samples with varying densities were produced, featuring warp and weft configurations of 48 ends per 10 cm. The density options included 48 weft ends (loose), 55 weft ends (dense), and 70 weft ends (very dense). Each carpet sample exhibited three different pile heights: a short range of 5.55-5.88 mm, a medium range of 6.58-7.75 mm, and a long range of 8.93-10.67 mm. Furthermore, a 2/2V weave pattern was employed to create carpet structures with loose and medium densities. On the other hand, a 1+2/3V pattern was utilized to construct the dense carpet. The pile yarn used in the carpet was composed of polypropylene fibers, with a linear density of 180 tex. This yarn consisted of a continuous bundle of filaments and had a non-twisted structure. The pile weight of the carpet ranged from 1006 g/m² to 2116 g/m², while the overall carpet weight ranged from 1850 g/m² to 3011 g/m². The measured pile height of the carpet ranged from 5.55 mm to 10.67 mm, while the carpet thickness varied from 8.7 mm to 14.3 mm. Table 2 displays the properties of the polypropylene pile yarn and carpet structure. It is important to note that all the data presented in the table represents average values obtained from the carpet samples.

Table 1. Fiber, yarn and substrate properties of polypropylene carpet structure.




Sample	Sample Codes	Yarn Linear Density (tex)			Yarn Composition (%)			Density (ends/10 cm)		Substrate Weight (warp+weft) (g/m ²)
		Warp		Weft	Warp		Weft	Warp	Weft	
		Stuffer	Chain		Stuffer	Chain				
	1PP6 1PP9 1PP12	211	118	556	80% Pes/ 20% Co	80% Pes/ 20% Co	Jute	48	48	843
	2PP6 2PP9 2PP12	211	118	556	80% Pes/ 20% Co	80% Pes/ 20% Co	Jute	48	55	925
	3PP6 3PP9 3PP12	211	118	556	80% Pes/ 20% Co	80% Pes/ 20% Co	Jute	48	70	896

Table 2. Pile yarn and carpet structure properties.

Sample Codes	Fiber type	Pile				Carpet		
		Yarn Linear Density (tex)	Substrate Thickness (mm)	Pile Height (mm)	Pile Density (knots/m ²)	Pile Weight (g/m ²)	Carpet Thickness (mm)	Carpet Weight (g/m ²)
1PP6	Polypropylene	180	2.82	6 (5.88)	230400	1006	8.7	1850 (1936)
1PP9	Polypropylene	180	3.12	9 (6.58)	230400	1297	9.7	2140 (2067)
1PP12	Polypropylene	180	3.28	12 (8.93)	230400	1546	12.2	2389 (2494)
2PP6	Polypropylene	180	2.95	6 (5.85)	264000	1109	8.8	2034 (2114)
2PP9	Polypropylene	180	2.92	9 (7.39)	264000	1442	10.3	2367 (2077)
2PP12	Polypropylene	180	2.94	12 (10.06)	264000	1727	13.0	2652 (2702)
3PP6	Polypropylene	180	3.46	6 (5.55)	336000	1330	9.0	2225 (2141)
3PP9	Polypropylene	180	3.56	9 (7.75)	336000	1753	11.3	2649 (2668)
3PP12	Polypropylene	180	3.64	12 (10.67)	336000	2116	14.3	3011 (2979)

2.2. Flexure (Bending) test

The modified bending test instrument used in this study was based on the fixed angle flexometer method, following the guidelines outlined in the ISO 4604 test standards [48]. The Peirce cantilever test [49,50] played a significant role in the development of the fixed angle flexometer method or inclined plane method. The cantilever base test device recorded a bending angle of $\theta=41.5^\circ$. A smooth horizontal platform was utilized to position the fabric sample, aligning one end of the sample with the platform's edge. The fabric sample was covered with a glass plate, ensuring that the starting point aligned with the zero point on the slide rule. The slide rule was slowly adjusted to allow the fabric sample to bend naturally due to its own weight. The bending test continued until the fabric sample reached the point of contact with the inclined platform at its end. Upon completing the test, the bending length was determined by measuring from the initial point on the slide rule. The bending test instrument used in the experiment is illustrated in Figure 1 (a-d). The carpet samples had dimensions of 2.5 cm (width) x 15 cm (length) for apparel fabric [51,52], while the technical fabric samples measured 30 cm (width) x 30 cm (length) [48]. The flexural tests on carpet samples were performed in both dry and wet conditions, and each test was repeated four times.

An in-house developed flexure test instrument was equipped with a digital camera (CANON PowerShot SX30 IS, JP). The curvature of the sample was recorded at the end of the testing process (Figure 1 (a)), and the image was analysed using the SnagIt drawing program to determine the bending curvature (Figure 1 (d)) [53].

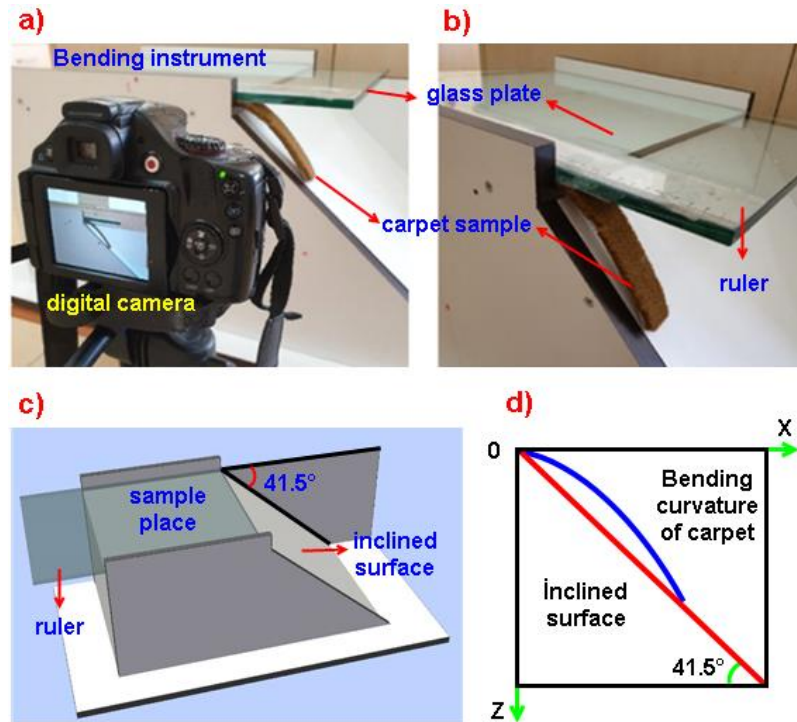


Figure 1. (a-b) Bending rigidity instrument during testing of carpet structure in warp direction, (c) schematic view of bending rigidity instrument, and (d) bending curvature obtained from digital camera during testing.

Equations (1-3) were used to calculate the bending length and bending rigidity of both apparel and technical fabrics.

$$c = \frac{l}{2} \quad (1)$$

$$G_1 = 0.1 \times m \times c^3 \quad (2)$$

$$G_2 = 9.81 \times m \times \left(\frac{l}{2}\right)^3 \quad (3)$$

where, m is the fabric unit areal weight (g. m^{-2}), l is the fabric length of overhang (apparel fabric, cm; technical fabric, m), c is the bending length (cm, m) and G_1 and G_2 are the bending rigidity of apparel (mg.cm) and technical fabrics (mN.m), respectively, 9.81 is the gravitational constant (m. s^{-2}).

2.3. Static loading test

The static loading test for face-to-face woven carpet samples was conducted in accordance with the test standards BS 4939 [54] and ISO 3416 [55]. The carpet samples used for static loading had dimensions of 10 cm x 10 cm. Prior to the test, the initial thickness (h_0) of each sample was measured. Subsequently, the image was transferred to the test instrument, and a pressure of 7 kg/cm^2 (0.687 MPa) was applied to the sample using a dead weight of 10 kg. The samples were subjected to static loading for a duration of 24 hours. Subsequently, the thickness loss of the sample was measured using a brief time period of 2 minutes. Due to a limited number of samples, the test was conducted twice. Figure 2(a-d) illustrates the static loading instrument used to test the carpet structure and display failed carpet samples.

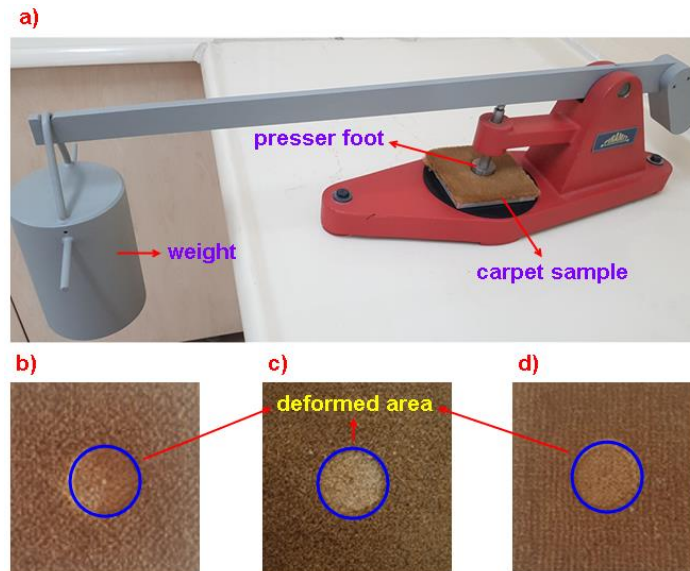


Figure 2. (a) Static loading instrument during testing of carpet structure, (b) image of deformed loose carpet short pile (1PP6), (c) image of deformed dense carpet short pile (2PP6) and (d) image of deformed very dense carpet short pile (3PP6) structure samples (digital photos).

The percentage of thickness loss in the carpet resulting from prolonged heavy static load was calculated using equation (4) [37].

$$\text{Thickness loss (\%)} = \left(\frac{h_0 - h_1}{h_0} \right) \times 100 \quad (4)$$

where, h_0 is the initial thickness (mm), h_1 is the thickness after 24 hours compression (after 2 minutes recovery time) (mm).

The initial pile thickness and pile thickness after static loading were measured using an Elastocon EV07 digital device, in accordance with TS 7125 [56] and TS 3374 [57], respectively. The mechanical tests were performed under standard laboratory conditions, with a temperature of $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ and a relative humidity of $50\% \pm 10\%$ [58]. The damaged surface of the carpet samples after static loading was captured using a high-resolution digital camera (CANON PowerShot SX30 IS, JP).

3. Results and Discussion

3.1. Carpet flexure results

Flexure rigidity results on various carpet structures are presented in Table 3, and Figure 3 (a-b) for apparel fabric and Figure 4 (a-b) technical fabric bending test methods.

Based on the analysis presented in Table 3 and Figure 3(a-b), the results pertaining to the dry bending rigidity, which was evaluated using the apparel fabric test method, revealed a noteworthy observation. Specifically, it was found that in relation to the loose structures, very dense structures exhibited a significant decrease of approximately 36.54%. The evaluation involved comparing the rigidity of fabrics with different structural characteristics, specifically loose structures versus very dense structures. The observed decrease in bending rigidity highlights an important distinction between these two types of fabric structures. The implications of this observation are significant for various applications in the textile industry. Fabrics with higher density are often preferred in certain carpets or products due to their ability to provide enhanced stability, shape retention, and durability. However, this decrease in bending rigidity suggests that very dense structures may exhibit a different range of mechanical properties compared to their loose counterparts. Further research and analysis are warranted to gain a comprehensive understanding of the underlying factors contributing to this observed decrease in bending rigidity. By exploring the structural aspects of the fabrics, such as fiber arrangement, yarn density, or fabric construction, it may be possible to elucidate the mechanisms responsible for this phenomenon.

Overall, the findings presented in Table 3 and Figure 3(a-b) underscore the importance of considering fabric structure and its influence on mechanical properties. This knowledge can inform the design and development of fabrics tailored to specific applications, ensuring optimal performance and customer satisfaction in various sectors of the textile industry. The wet bending rigidity of highly dense carpet structures exhibited a 17.57% decrease when compared to loose carpet structures. This suggests that the bending rigidity of polypropylene carpet samples displayed similar outcomes in both dry and wet conditions. The bending test results for apparel fabric indicated that as the weight of the carpet (measured in areal density, g/m^2) increased, the bending rigidity (measured in $\text{mg}\cdot\text{cm}$) decreased across different carpet structures, ranging from loose to very dense. This decrease in bending rigidity can be attributed to the corresponding increase in weft density. Additionally, it was observed that the average dry bending rigidity of polypropylene carpet samples exceeded the average wet bending rigidity by a factor of 2.07. This difference can be attributed to the increased carpet weight resulting from water uptake. On the contrary, the polypropylene pile height likely had an indirect impact on the bending rigidity of the carpet, primarily through its influence on the carpet's areal density. As the pile height increased, it resulted in a corresponding incremental increase in the carpet's areal density. The relationship between pile height and bending rigidity is complex, with the pile height acting as a contributing factor to the overall behaviour of the carpet. By increasing the pile height, more polypropylene fibers are incorporated into the carpet structure, thereby increasing its overall density and weight. This increase in areal density can subsequently influence the bending rigidity of the carpet. It is important to note that the effect of pile height on bending rigidity may not be direct but rather mediated through the resulting changes in the carpet's structural properties. The interplay between pile height, fiber density, and overall carpet construction can collectively affect the carpet's bending rigidity.

Further investigation and analysis are required to gain a comprehensive understanding of the specific mechanisms underlying the relationship between pile heights, areal density, and bending rigidity. By exploring these factors in more detail, researchers can unravel the intricate interdependencies and provide valuable insights into optimizing carpet design for specific performance requirements.

Table 3. Flexural results of dry and wet form of polypropylene carpets.

Bending for apparel fabric				
Sample	Dry		Wet	
	Length of overhang l (cm)	Bending rigidity G₁ (mg.cm)	Length of overhang l (cm)	Bending rigidity G₁ (mg.cm)
1PP6-G ₁	12.63±0.15	48713.30±1739.68	9.25±0.19	19171.69±1200.28
1PP9- G ₁	11.28±0.24	38029.77±11807.67	8.40±0.08	15317.25±446.60
1PP12-G ₁	7.50±1.22	13972.35±7462.33	6.43±0.31	8311.28±1164.23
2PP6-G ₁	12.40±0.78	50679.03±7529.48	10.70±0.38	32410.01±2237.60
2PP9-G ₁	11.38±1.32	39363.21±13254.41	8.18±0.46	14282.56±2264.66
2PP12-G ₁	8.63±0.99	22334.18±8084.65	7.23±0.29	12782.97±1464.92
3PP6-G ₁	9.70±0.18	24444.88±1379.44	7.98±0.38	13642.74±1926.04
3PP9-G ₁	8.15±0.72	18361.89±4443.46	7.03±0.53	11712.29±2702.35
3PP12-G ₁	9.40±0.18	30955.12±1802.50	6.65±0.42	11049.22±2079.97
Bending for technical fabric				
Sample	Dry		Wet	
	Length of overhang l (cm)	Bending rigidity G₂ (mN.m)	Length of overhang l (cm)	Bending rigidity G₂ (mN.m)
1PP6-G ₂	17.00±6.36	11.78±2.91	8.90±12.73	1.72±0.72
1PP9- G ₂	16.55±12.02	11.58±2.51	8.40±4.24	1.51±0.23
1PP12-G ₂	15.90±5.66	12.32±1.31	6.75±12.02	0.99±0.51
2PP6-G ₂	17.45±0.71	13.77±0.17	11.45±0.71	3.89±0.07
2PP9-G ₂	17.65±0.71	14.00±0.17	10.30±5.66	2.80±0.46
2PP12-G ₂	16.25±4.95	14.24±1.30	9.15±10.61	2.59±0.88
3PP6-G ₂	14.55±3.54	8.09±0.59	8.15±6.36	1.43±0.33
3PP9-G ₂	13.55±14.85	8.29±2.68	6.90±5.66	1.09±0.26
3PP12-G ₂	13.15±4.95	8.32±0.94	5.90±5.66	0.76±0.22

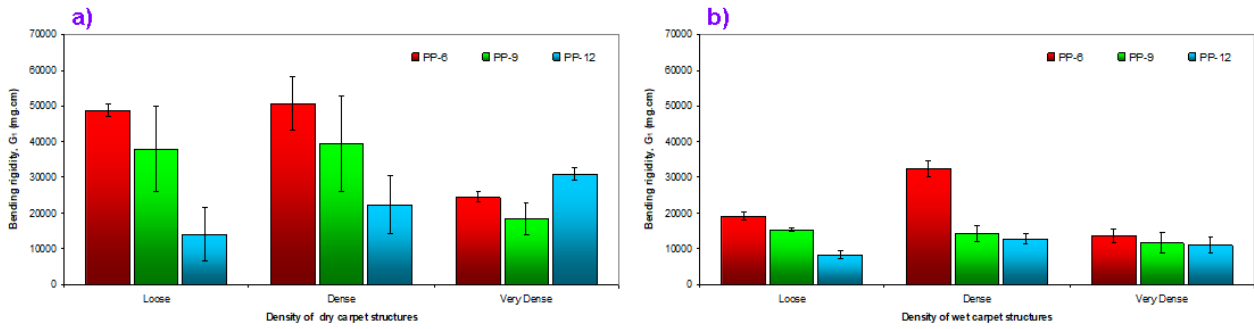


Figure 3. Flexural results on dry and wet form of carpet samples. (a) Dry carpet samples for apparel fabric methods, and (b) wet carpet samples for apparel fabric methods, respectively.

Table 3 and Figure 4(a-b) demonstrate the dry bending rigidity measured using the technical fabric test method. The results revealed a significant 44.45% reduction in very dense structures compared to loose structures. Compared to loose carpet structures, the wet bending rigidity of very dense carpet structures exhibited a reduction of 28.66%. The observation indicated that both dry and wet polypropylene carpet samples exhibited similar results in terms of their bending rigidity. Furthermore, it was found that the average dry bending rigidity of polypropylene carpet samples surpassed the average wet bending rigidity by a factor of 6.10. This substantial difference in rigidity can be considered to the additional weight absorbed by the wet carpet, resulting in decreased flexibility and bending resistance. On the contrary, it can be inferred that the pile height of the carpet indirectly influenced its bending rigidity, as an increase in pile height typically led to a gradual rise in the carpet's areal density. This relationship suggests that as the pile height increased, more fibers were present per unit area, resulting in a denser carpet structure. Consequently, the increased areal density contributed to higher bending rigidity in the carpet. Moreover, the findings revealed a striking disparity between the bending behaviour of apparel fabric and technical fabric, with the former exhibiting remarkably higher values. The bending characteristics of the apparel fabric surpassed those of the technical fabric by a significant margin, indicating substantial variations in their mechanical properties. The stark contrast in bending performance highlights the distinctive nature of these two fabric types and underscores the importance of considering their unique characteristics in relevant applications. For future research, the bending test for technical fabric can be streamlined to determine the flexural properties of heavy three-dimensional dry or impregnated polymeric preforms, especially in the manufacturing of complex-shaped moulded parts.

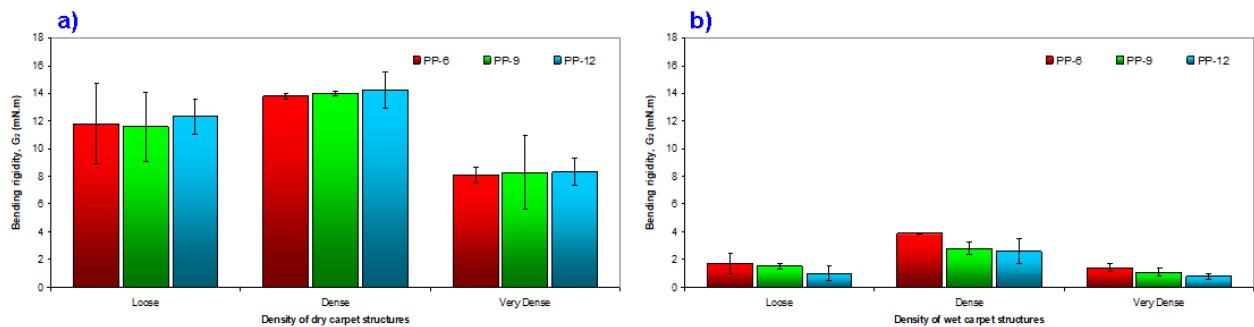


Figure 4. Flexural results on dry and wet form of carpet samples. (a) Dry carpet samples for technical fabric methods, and (b) wet carpet samples for technical fabric methods, respectively.

3.2. Carpet static loading results

The impact of static loading (compression) on the thickness (mm) and percentage thickness loss (%) of different polypropylene pile carpet structures can be seen in Table 4 and Figure 5. The average percentage thickness loss of dry carpets under vertical distributed load (compression) after 24 hours was examined, as shown in Table 4 and Figure 5. Among the loose carpet samples, slight increases were observed in the thickness loss of 1PP6, 1PP9, and 1PP12. Conversely, significant increases were observed in the thickness loss of 2PP6, 2PP9, and 2PP12 in dense carpet. Additionally, a linear increase in thickness loss was observed in 3PP6, 3PP9, and 3PP12 in very dense carpet. As the pile density increases, the variability in thickness loss diminishes across all polypropylene pile heights (Figure 5). This observation may be related to the rise in knot density, which consequently influenced the friction between polypropylene fibers (cohesion friction) and indirectly impacted weft density. The increase in

knot density led to enhanced interlocking of fibers, resulting in a greater resistance to pile compression and subsequently reducing thickness loss. Therefore, the thickness loss exhibited a proportional relationship with the pile density, indicating that as the pile density increased from loose to very dense carpets, the corresponding thickness loss followed a similar trend. The thickness loss typically decreases with increasing pile density, as the compression load-carrying capacity of each individual knot becomes higher in carpets with denser knots compared to those with sparser knots per unit area. Moreover, the impact of pile heights on the thickness loss of polypropylene carpets, ranging from loose to very dense, was found to be relatively insignificant. This can be attributed to the complex mechanism of buckled pile yarn deformation occurring within the constrained substrate. Within this context, several critical structural parameters were taken into account, including the specifications of the pile yarn, such as linear density, knots density, polypropylene fiber-to-fiber friction, and the use of twisted plied or untwisted textured forms [59].

Table 4. Thickness and thickness loss after static loading on various dry carpets.

Sample codes	Initial thickness (h_0) (mm)	Final thickness (h_1) (mm)	Thickness Loss (mm)	Thickness Loss (%)
1PP6	8.70	4.50±2.83	4.20±0.28	48.28±3.25
1PP9	9.70	5.20±2.90	4.50±0.57	46.39±5.83
1PP12	12.20	6.25±4.24	5.95±0.07	48.77±0.58
2PP6	8.80	5.70±2.90	3.10±1.41	35.23±16.07
2PP9	10.30	5.00±3.68	5.30±0.14	51.46±1.37
2PP12	13.00	6.85±4.38	6.15±0.07	47.31±0.54
3PP6	9.00	5.80±2.26	3.20±0.00	35.56±0.00
3PP9	11.30	6.80±3.04	4.50±0.28	39.82±2.50
3PP12	14.30	8.35±3.89	5.95±0.64	41.61±4.45

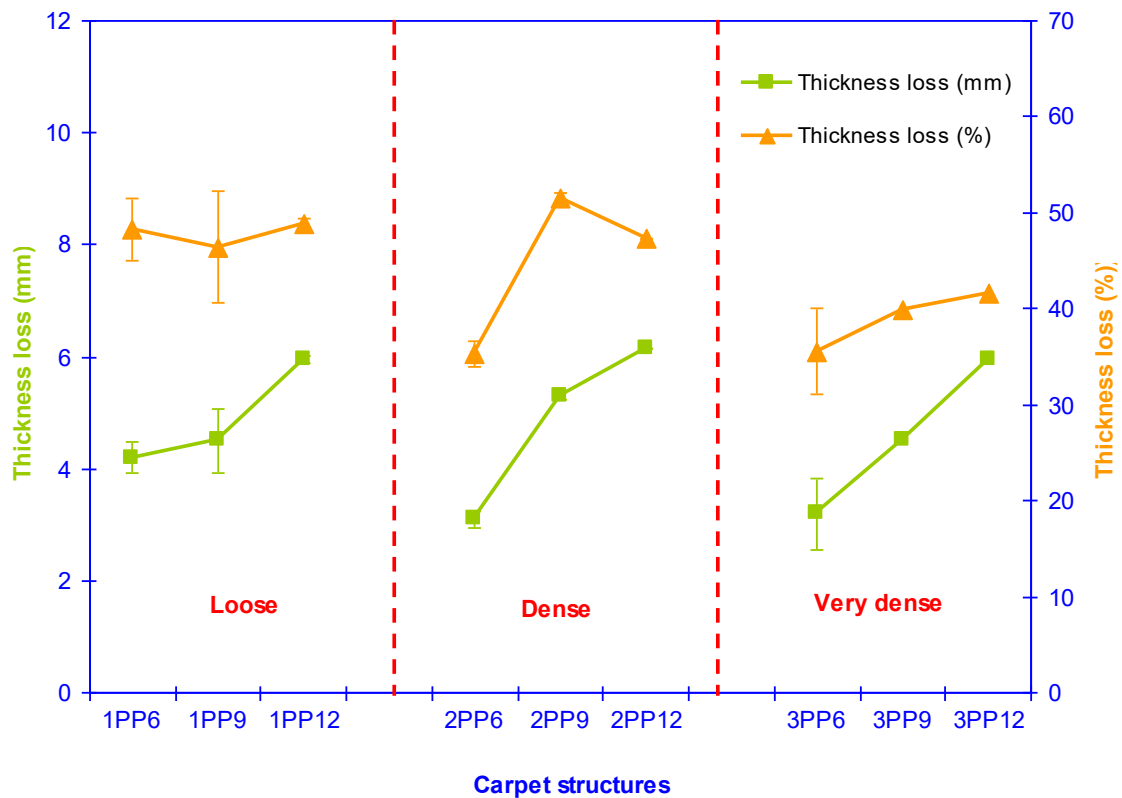


Figure 5. Thickness loss (mm, %) relations after static loading on the dry carpets.

4. Conclusions

The findings indicated that the flexure rigidity (measured in mN.m) based on the technical fabric test decreased as the carpet structures transitioned from loose to very dense. This decrease in flexure rigidity may be attributed to the influence of the sample size, as larger sample sizes tend to impact flexure stiffness. Moreover, it was identified that the average dry bending rigidity of polypropylene carpet surpassed the average wet bending rigidity by a factor of 2.06 for apparel fabric and 6.10 for technical fabric. In conclusion, the bending test conducted on technical fabric proved to be a simplified method for determining the flexural properties of heavy three-dimensional dry or impregnated polymeric preforms. The percentage of thickness loss from loose to very dense polypropylene carpets exhibited a proportional relationship with the pile density. Generally, as the pile density increases, there is a decrease in thickness due to the improved compression load carrying capacity of each knot. This effect is more pronounced in carpets with denser knots compared to those with sparser knots per unit area. In future studies, we intend to conduct further research specifically focused on the manufacturing of complex-shaped moulded parts by generating load-displacement and stress-strain curves.

Acknowledgments

This work was mainly supported by the Gumussuyu Hali Inc. subsidiary of Erciyes Anadolu Holding. The authors would like to thank them for their invaluable support.

References

- [1] Erdogan, G., Yucel, S., Bilisik, K. 2023. Textured Polyester Fiber in Three-Dimensional (3D) Carpet Structure Application: Experimental Characterizations under Compression-Bending-Abrasion-Rubbing Loading. *Polymers*, 15(14), 3006, 1-26.
- [2] Chaudhuri, S.K., Bandyopadhyay, S. 2017. Structure and properties of carpet fibres and yarns. In: *Advances in Carpet Manufacture*. Woodhead Publishing. pp. 19-43.
- [3] Gupta, S.K., Goswami, K.K., Majumdar, A. 2015. Durability of Handmade Wool Carpets: A Review. *Journal of Natural Fibers*, 12(5), 399-418.
- [4] Hearle, J.W.S. 2009. Fibre structure: its formation and relation to performance. In: *Handbook of textile fiber structure. Volume 1: Fundamentals and manufactured polymer fibers*. Eichhorn, S.J., Hearle, J.W.S., Jaffe M., Kikutani, T., Eds.; Woodhead Publishing and CRC Press LLC, Cambridge, UK, pp. 81-225.
- [5] Mansfield, R.G. 1999. Polypropylene in the Textile Industry. *Plastics Engineering*, 30.
- [6] Galanti, A.V., Mantell, C.L. 1965. *Polypropylene fibers and films*. Springer Science, Business Media, LLC, New Jersey, USA.
- [7] Presley, A.B. 1997. Evaluation of carpet appearance loss: Structural factors. *Textile Research Journal*, 67(3), 174-180.
- [8] Wang, J., Wood, E. J. 1994. A New Method for Measuring Carpet Texture Change. *Textile Research Journal*, 64(4), 215-224.
- [9] Wilding, M. A., Lomas, B., Woodhouse, A. K. 1990. Changes Due to Wear in Tufted Pile Carpets. *Textile Research Journal*, 60(11), 627-640.
- [10] Xu, B. 1997. Quantifying Surface Roughness of Carpets By Fractal Dimension. *Clothing and Textile Research Journal*, 15(3), 155-161.
- [11] Postle, R., Carnaby, G. A., de-Jong S. 1988. *The mechanics of wool structures*. John Wiley, New York.
- [12] Beil, N. B., Roberts, W. W. 2002. Modeling and Computer Simulation of the Compressional Behavior of Fiber Assemblies: Part I: Comparison to Van Wyk's Theory. *Textile Research Journal*, 72(4), 341-351.
- [13] Vangheluwe, L., Kiekens, P. 1997. Resilience Properties of Polypropylene Carpets. *Textile Research Journal*, 67(9), 671-676.
- [14] Laughlin, K. C., Cusick, G. E. 1968. Carpet Performance Evaluation, Part II: Stress-Strain Behavior. *Textile Research Journal*, 38(1), 72-80.
- [15] Wood, E. J. 1993. Description and Measurement of Carpet Appearance. *Textile Research Journal*, 63(10), 580-594.
- [16] Savilla, B. P. 1999. *Physical testing of textiles*. The Textile Institute, Woodhead Publishing.

- [17] Goswami, K. K. 2018. *Advances in carpet manufacture*, Elseviere Ltd, Cambridge, MA, USA.
- [18] Wu, J., Pan, N. Williams, K. R. 2007. Mechanical, Biomechanical and Psychophysical Study of Carpet Performance. *Textile Research Journal*, 77(3), 172-178.
- [19] McNeil, S. J., Tapp, L. S. 2016. The Design and Initial Evaluation of Visual Cues in Carpets to Assist Walking. *Journal of The Textile Institute*, 107(3), 376-385.
- [20] Kucuk, M., Korkmaz, Y. 2017. Sound Absorption Properties of Acrylic Carpets. *The Journal of The Textile Institute*, 108(8), 1398-1405.
- [21] Kucuk, M., Korkmaz, Y. 2019. Acoustic and Thermal Properties of Polypropylene Carpets: Effect of Pile Length and Loop Density. *Fibers and Polymers*, 20(7), 1519-1525.
- [22] Grosberg, P. 1966. The Mechanical Properties of Woven Fabrics Part II: The Bending of Woven Fabrics. *Textile Research Journal*, 36, 205-214.
- [23] Abbott, N.J. 1951. Part II: A Study of the Peirce Cantilever Test for Stiffness of Textile Fabrics. *Textile Research Journal*, 21, 441-444.
- [24] Skelton, J. 1971. The Bending Behavior of Fabrics at High Curvatures. *Textile Research Journal*, 41, 174-181.
- [25] Gibson, V.L., Postle, R. 1978. An Analysis of the Bending and Shear Properties of Woven, Double-Knitted and Warp-Knitted Outer-Wear Fabrics. *Textile Research Journal*, 48, 14-27.
- [26] Matsuo, T. 1969. Bending of Woven Fabrics. *Journal of the Textile Machinery Society of Japan*, 15, 19-33.
- [27] Cooper, D.N.E. 1960. The Stiffness of Woven Textiles. *Journal of The Textile Institute*, 51, T317-T335.
- [28] Ghosh, T.K., Batra, S.K., Barker, R.L. 1990. The Bending Behaviour of Plain-Woven Fabrics Part I: A Critical Review. *Journal of The Textile Institute*, 81, 245-254.
- [29] Hu, J. 2004. *Structure and mechanics of woven fabrics*. Woodhead Publishing Ltd, Cambridge, UK.
- [30] Park J-W., Oh, A-G. 2006. Bending Rigidity of Yarns. *Textile Research Journal*, 76, 478-485.
- [31] Bilisik, K. 2011. Bending Behavior of Multilayered and Multidirectional Stitched Aramid Woven Fabric Structures. *Textile Research Journal*, 81, 1748-1761.
- [32] Dolatabadi, M. K., Montazer, M., Latifi, M. 2005. The Effect of Polyester Fibres on Quality of Hand-Knotted Carpets. *Journal of The Textile Institute*, 96, 1-9.
- [33] Kimura, K., Kawabata, S., Kawai, H. 1970. Compressive Deformation theory of Carpets. *Journal of the Textile Machinery Society of Japan*, 23, T67-T76.
- [34] Kimura, K., Kawabata, S. 1971. Improvement of the Compressive Deformation Theory of Carpets and Its Application to the Carpet Woven from Compressible Yarn. *Journal of the Textile Machinery Society of Japan*, 24, T207-T214.
- [35] Celik, N., Koc, E. 2007. An Experimental Study on Thickness Loss of Wilton Type Carpets Produced with Different Pile Materials After Prolonged Heavy Static Loading. Part 2: Energy Absorption and Hysteresis Effect. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 15, 87-92.
- [36] Celik, N., Koc, E. 2010. Study on the Thickness Loss of Wilton-Type Carpets under Dynamic Loading. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 78, 54-59.
- [37] Koc, E., Celik, N., Tekin, M. 2005. An Experimental Study on Thickness Loss of Wilton-Type Carpets Produced with Different Pile Materials After Prolonged Heavy Static Loading. Part-I: Characteristic Parameters and Carpet Behaviour. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 13, 56-62.
- [38] Dubinskaite, K., Langenhove, L.V., Milasius, R. 2008. Influence of Pile Height and Density on The End-Use Properties of Carpets. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 16(3), 68.
- [39] Sarioğlu, E., Kaynak, H.K., Çelik, H.İ., Vuruşkan, D. 2019. Effects of Structural Parameters on Compressibility and Soiling Properties of Machine Woven Carpets. *Journal of The Textile Institute*, 110, 1263-1270.
- [40] Tabatabaei, S. M., Ghane M. 2015. Effect of Traffic Exposure on Toughness Characteristics of Hand-Knotted Carpets. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 23, 64 -68.
- [41] Jafari, S., Ghane, M., Moezzi, M. 2017. The Effect of UV Degradation on the Recovery Behaviour of Cut-Pile Carpets After Static Loading. *Journal of The Textile Institute*, 108, 256-259.
- [42] Dayiary, M., Najar, S.S., Shamsi, M. 2010. An Experimental Verification of Cut-Pile Carpet Compression Behaviour. *Journal of The Textile Institute*, 101, 488-494.

- [43] Dayiary, M., Najar, S.S., Shamsi, M. 2009. A New Theoretical Approach to Cut-Pile Carpet Compression Based on Elastic-Stored Bending Energy. *Journal of The Textile Institute*, 100, 688–694.
- [44] Jafari, S., Ghane, M. 2016. An Analytical Approach for The Recovery Behavior of Cut Pile Carpet After Static Loading by Mechanical Models. *Fibers and Polymers*, 17, 651-655.
- [45] Khavari, S., Ghane, M. 2017. An Analytical Approach for the Compression and Recovery Behavior of Cut Pile Carpets Under Constant Rate of Compression by Mechanical Models. *Fibers and Polymers*, 18, 190-195.
- [46] VANDEWIELE NV. Carpet weaving: Face-to-face carpet weaving. <http://www.vandewiele.be/carpetlooms.htm>, (accessed on 1 January 2022).
- [47] Erdogan, G. Yücel, S. 2023. Üç Boyutlu (3B) Polipropilen Halı Yapıların Aşınma ve Sürtünme Özellikleri. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 39(1), 138-149.
- [48] ISO 4604. 1978. Textiles glass-woven fabrics-determination of conventional flexural stiffness-fixed angle flexometer method; International Organization for Standardization.
- [49] Peirce, F.T. 1937. The Handle of Cloth as a Measurable Quantity. *Journal of The Textile Institute*, 21, 377–416.
- [50] Peirce, F.T. 1937. The Geometry of Cloth Structure. *Journal of The Textile Institute*, 28, 45–96.
- [51] BS 3356. 1990. Method for determination of bending length and flexural rigidity of fabrics; British Standards Institution.
- [52] TS 1409. 1974. Method for determination of flexural rigidity of woven fabrics; Turkish Standards Institution.
- [53] Bilisik, K., Yolacan, G. 2012. Experimental Determination of Bending Behavior of Multilayered and Multidirectionally-Stitched E-Glass Fabric Structures for Composites. *Textile Research Journal*, 82, 1038-1049.
- [54] BS 4939. 2007. Method for Determination of Thickness Loss of Textile Floor Coverings After Prolonged Heavy Static Loading; British Standards Institution.
- [55] ISO 3416. 1986. Textile Floor Coverings; Determination of Thickness Loss After Prolonged Heavy Static Loading; International Organization for Standardization.
- [56] TS 7125 (ISO 1766). 2003. Textile floor coverings-Determination of thickness of pile above the substrate; International Organization for Standardization.
- [57] TS 3374 (ISO 1765). 1991. Machine made textile floor coverings- determination of thickness; International Organization for Standardization.
- [58] ISO 139. 2005. Textiles-Standard atmospheres for conditioning and testing; International Organization for Standardization.
- [59] Hearle, J.W.S., Grosberg, P., Backer, S. 1969. *Structural mechanics of fibres, yarn and fabrics*, Wiley Interscience, Inc, New York, USA.

Farklı SUVA Değerine Sahip Sulardan Karbon Nanotüpler ile Doğal Organik Maddenin Adsorptif Giderimi

Seda Tözüm Akgül^{*1}, Şerife Kaya², Mehmet Kitiş², Şehnaz Şule Kaplan Bekaroğlu²

^{*1} Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Yalvaç Teknik Bilimler MYO, ISPARTA

² Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği, ISPARTA

(Alınış / Received: 11.08.2023, Kabul / Accepted: 21.08.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 31.08.2023)

Anahtar Kelimeler

Karbon nanotüp,
İçme suyu,
Doğal organik madde
Spesifik UV Absorbansı
Hümitik asitler

Öz: Bu çalışmada farklı SUVA değerine sahip sentetik çözeltilerden ve doğal sulardan karbon nanotüpler (KNT) kullanılarak doğal organik madde (DOM) giderimi çalışılmıştır. KNT'ler kıyaslama yapmak amacıyla asitle modifiye edilerek de kullanılmıştır. KNT'nin asitle modifikasyonu sonucu, karbon yüzey fonksiyonel gruplarının değiştiği gözlemlenmiştir. Deneysel sonuçlar, DOM gideriminde orijinal KNT'lerin, modifiye KNT'lerden çok daha etkili olduğunu göstermiştir. Orijinal KNT'ler ile farklı sentetik çözeltilerden %80'e varan UV absorbans giderim verimleri sağlanırken modifiye KNT'ler ile en fazla %22 UV absorbans giderim verimi elde edilebilmiştir. Orijinal KNT'ler ile en yüksek DOM giderim verimi, en yüksek SUVA değerine (6,1 L/mg org-C. m) sahip olan 1R107F kodlu sentetik çözeltide elde edilmiş olup %79,5 UV₂₅₄ absorbans giderimi ve %55,5 çözünmüş organik karbon (ÇOK) giderimi sağlanmıştır. Bu durum orijinal KNT'lerin, tercihen DOM'un UV absorptlayan fraksiyonunu gidermekte etkili olduklarını göstermektedir. Düşük SUVA (0,8 L/ mg org-C. m) değerine sahip doğal su numunesinde ise sırasıyla elde edilen UV₂₅₄ absorbans ve ÇOK giderim verimleri %65,7 ve %45,2'dir.

Adsorptive Removal of Natural Organic Matter from Waters with Different SUVA Values by Carbon Nanotubes

Keywords

Carbon nanotube,
Drinking water,
Natural organic matter,
Specific UV Absorbance,
Humic acids

Abstract: In this study natural organic matter (NOM) removal from synthetic solutions and natural waters with different SUVA values was studied using carbon nanotubes (CNTs). CNTs were also used by acid modification for comparison. As a result of acid modification of CNTs, it was observed that the carbon surface functional groups changed. The experimental results showed that the original CNTs were much more effective than the modified CNTs in NOM removal. In different synthetic solutions, while UV absorbance removal efficiencies of up to 80% were achieved with the original CNTs, maximum 22% UV absorbance removal efficiency could be obtained with modified CNTs. The highest NOM removal with the original CNTs was obtained in the synthetic solution coded 1R107F, which had the highest SUVA value (6.1 L/mg org-C. m), and 79.5% UV₂₅₄ absorbance removal and 55.5% dissolved organic carbon (DOC) removal was achieved. This indicates that the original CNTs are preferentially effective in removing the UV absorbing fraction of NOM. In the natural water sample with low SUVA (0.8 L/mg org-C. m), the UV₂₅₄ absorbance and DOC removal efficiencies were 65.7% and 45.2%, respectively.

*İlgili Yazar, email: sedatozum@gmail.com

1. Giriş

Doğal organik madde (DOM), içme suyu kalitesi üzerinde önemli etkiye sahip olan organik ve kısmen suda çözünebilir bileşenlerin bir kombinasyonudur [1]. DOM, karbonhidratlar, aminoasitler, hümik ve fülvik asitler gibi organik bileşiklerden oluşmaktadır [2]. Sulardaki DOM'ların varlığı, toplam organik karbon (TOK), çözünmüş organik karbon (ÇOK) gibi parametrelerle hızlı ve basit bir şekilde belirlenebilir. Ancak bu parametreler DOM'un karakterinden çok, miktarı hakkında bilgi vermektedir [3]. Numunelerin 254-280 nm aralığındaki UV absorbansının ölçümü ile sulardaki aromatik bileşiklerin miktarı hakkında bilgi edinilebilir. Spesifik UV absorbansı (SUVA) ise, su numunesinin 254 nm'deki UV absorbansının numunenin ÇOK konsantrasyonuna bölünmesi ile belirlenir. SUVA değeri, suyun hidrofobik ve hidrofilik karakteri açısından doğasını tanımlayan bir parametredir. SUVA değeri 3 L/mg org-C. m'dan küçük olduğunda çoğunlukla hidrofilik karakterli ve daha az aromatik materyali gösterirken 4 L/mg org-C. m'den büyük olduğunda ise çoğunlukla hidrofobik ve özellikle aromatik materyalleri göstermektedir [3-5]. DOM'un karakteri/bileşimi, arıtılabilirliğini etkilemekte ve özellikle UV absorplayan fraksiyonları da genellikle dezenfeksiyon yan ürünlerinin (DYÜ) oluşumuna sebep olmaktadır [6]. Su standartlarını düzenleyen yetkili kurumlar, ham ve arıtılmış sudaki SUVA değeri 2 L/mg org-C. m'den az olduğunda zenginleştirilmiş koagülasyon prosesini zorunlu tutmamaktadır çünkü deneyler, koagülasyon prosesinin bu kadar düşük SUVA₂₅₄ değerine sahip sulardan ÇOK'u gidermek için etkili olmadığını göstermiştir [7].

DOM; tat, koku ve renk ile ilgili su kalitesi bozulmalarına sebep olmasının yanında insan sağlığını olumsuz yönde etkileyecek kanserojen olduğu bilinen dezenfeksiyon yan ürünlerinin oluşumuna da sebep olabilmektedir. Bu nedenle THM, HAA gibi DYÜ'ler ile ilgili standartlar giderek daha da sıkılaşmaktadır. DYÜ oluşumunu kontrol etmek için; i. DYÜ öncülleri yani DOM ortadan kaldırılabılır ii. Kullanılan dezenfektan miktarı azaltılabilir ya da uygulama noktası değiştirilebilir iii. Uygulanan dezenfektan değiştirilebilir. Bu üç yaklaşım içinde en etkili yaklaşım ise dezenfeksiyon işleminden önce DOM giderimini sağlamaktır [8]. Su arıtımında zenginleştirilmiş koagülasyon, membran prosesleri, adsorpsiyon ve iyon değişimi gibi çok sayıda arıtma teknolojisi, DOM gideriminde araştırılmış ve kullanılmıştır [9].

Karbon nanotüpler (KNT), filtrasyon ve/veya adsorpsiyon gibi su arıtma uygulamaları için umut verici malzemelerdir. KNT'lerin yüksek yüzey alanları, hidrofobiklik, gözeneklilik, hızlı adsorpsiyon kinetiği, basit rejenerasyon teknikleri ve yüksek termal kararlılık gibi özellikleri su arıtımında etkili adsorbentler olarak kullanılmasını sağlar [10]. Şimdiye kadar KNT'ler sulardan ağır metal [11], boya [12] gideriminde adsorbent olarak test edilmiştir. KNT'lerin, DOM adsorpsiyonda da yüksek afiniteye sahip olduğu bilinmektedir [13-15].

Wang ve çalışma arkadaşları, [15] KNT'lerin sorpsiyon davranışlarını incelemek için, fonksiyonelleştirilmiş çok duvarlı KNT'ler ve hümik asit kullanmışlardır. Çalışmada dış çapı 8-15 nm arasında değişen beş farklı çok duvarlı KNT kullanılmış ve sorpsiyon kapasiteleri MCNT15> MCNT15-NH₂> MCNT15-OH> MCNT15-COOH> MCNT15-Ni sırasında bulunmuştur. Engel ve Chefetz, [17], tek duvarlı KNT'ler ile DOM'ların adsorpsiyon/desorpsiyon süreçlerine odaklanmaktadır. Çalışmada, tuzluluk ve DOM kaplamasının tek duvarlı KNT'lerin düzenini etkilediği ve adsorpsiyon alanlarının da elverişli kullanılabilirliğini değiştirdiği tespit edilmiştir. Sonuçlar, pH'ı değişen, iyonik güç ve sıcaklıktan etkilenen nehir, akarsu gibi çevresel sistemlerde DOM ile tek duvarlı KNT'lerin davranışının daha iyi anlaşılmasına yardımcı olmaktadır. Jacquin vd., [10], DOM içeren sularda virüs giderimi için çok duvarlı KNT filtrelerinin sahada uygulanabilirliğini değerlendirmiştir. Sonuçlar doğal sularda bulunan NOM/virüs oranlarında, DOM'un düşük konsantrasyonlarda bile virüsün çok duvarlı KNT'ler tarafından adsorpsiyonunu baskıladığını göstermiştir. Bu nedenle yazarlar, ticari olarak temin edilen çok duvarlı karbon nanotüpler ile oluşturulacak filtrelerin içme suyu arıtımında virüs giderimi için kullanılmasının uygun olmadığını belirtmişlerdir. Khodabakhshi ve arkadaşları, [1] demir oksit ile kaplanmış çok duvarlı KNT'ler ile gerçek ve sentetik hümik asitin giderim etkinliklerini incelemişlerdir. pH=3, 120 rpm karıştırma hızı, 1500 mg/L adsorbent dozu ve 90 dakika temas süresi, NOM giderimi için optimum şartlardır. DOM giderim verimleri, sentetik su örneklerinde 20 mg/L başlangıç DOM konsantrasyonu için%94,41 iken Choghakhor Sulak Alanında DOM giderim verimi %77'dir.

KNT'lerin yüzey kimyaları, konvansiyonel granül aktif karbonlara oldukça benzerdir [13]. Bu nedenle yüksek maliyet ve zayıf rejenerasyon kabiliyeti gibi zorluklarla kullanımı kısıtlanan aktif karbonlara, KNT'ler alternatif bir adsorbent olabilirler [18]. Şimdiye kadar çeşitli araştırmalarla KNT'lerin hümik asit, fülvik asit ve sentetik organik maddeleri giderme etkinlikleri araştırılmış ancak farklı DOM içeriklerini gidermedeki etkinlikleri araştırılmamıştır. Bu çalışmanın amacı, farklı SUVA değerine sahip sularda karbon nanotüplerin DOM giderme etkinliklerini test etmektir. Bu amaçla farklı DOM içeriğine (farklı SUVA değerine) sahip altı farklı sentetik çözelti ve bir doğal su örneği kullanılmıştır. Bununla birlikte KNT'lerin modifikasyonunun da etkisini araştırmak amacıyla, KNT'ler asitle modifiye edilmiş ve modifiye KNT'lerin de DOM giderme etkinlikleri test edilmiştir.

2. Materyal ve Metot

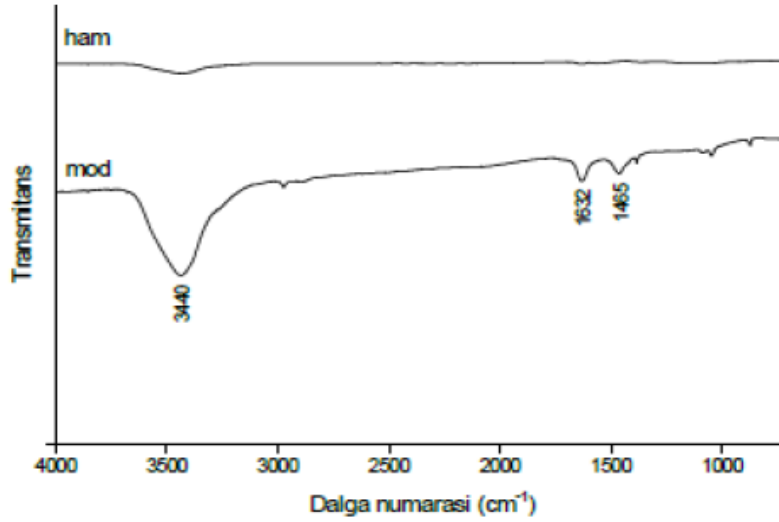
2.1. Materyaller

DOM kaynağı olarak sentetik şekilde hazırlanan çözeltiler ve doğal su kaynağı kullanılmıştır. Sentetik çözeltilerin hazırlanmasında Uluslararası Hüyük Maddeler Derneğinden (IHSS temin edilen 7 farklı kaynak malzeme kullanılmıştır: Suwannee River Fulvic Acid Standard II, Suwannee River NOM (RO isolation), Waskish Peat Humic Acid Reference, Waskish Peat Fulvic Acid Reference, Nordic Aquatic Fulvic Acid Reference, Nordic Reservoir NOM (RO isolation). 7 farklı kaynaktan elde edilen malzemeler ile TOK konsantrasyonu 4 mg/L olacak şekilde distile ve deiyonize su kullanılarak çözeltiler hazırlanmıştır. Doğal su kaynağı ise, Eğirdir Gölü'nden temin edilmiştir. Hazırlanan sentetik çözeltilerin ve doğal su kaynağının kodlamaları ve fizikokimyasal özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur. SUVA değeri, sudaki DOM'un doğasını hidrofobiklik ve hidrofiliklik açısından tanımlayan bir terimdir. SUVA değeri 4 L/mg org-C. m'den büyük olduğunda, su kaynağının yüksek SUVA değerine sahip olduğu söylenebilir ve DOM'un çoğunlukla hidrofobik ve aromatik materyallerden oluştuğunu göstermektedir. SUVA değeri 3 L/mg org-C. m'den küçük olan düşük SUVA'lı sular ise DOM çoğunlukla hidrofilik materyallerden oluşmaktadır [3], [4]. Bu anlamda 1R107F, 1R107H, 1R105F ve 2S101F kodlu çözeltilerin yüksek SUVA'lı sular olduğu söylenebilir. Eğirdir Gölü ise düşük SUVA değerine sahip bir sudur.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan su numunelerinin kodlamaları ve fizikokimyasal özellikleri

DOM Kaynağı	Simgesi	ÇOK (mg/L)	UV ₂₅₄ Abs.	SUVA (L/mg org-C. m)	pH
Suwannee River Fulvic Acid Standard II	2S101F	3,97	0,198	4,2	6,94
Suwannee River NOM (RO isolation)	1R101N	4,3	0,142	3,2	6,93
Waskish Peat Humic Acid Reference	1R107H	3,99	0,219	5,5	6,99
Waskish Peat Fulvic Acid Reference	1R107F	4,2	0,258	6,1	7,03
Nordic Aquatic Fulvic Acid Reference	1R105F	3,92	0,201	5,1	6,95
Nordic Reservoir NOM (RO isolation)	1R108N	2,68	0,097	3,6	7,02
Eğirdir	Eğirdir	4,2	0,035	0,8	7,03

Adsorbent olarak kullanılan çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) ticari olarak temin edilmiştir ve 10-20 nm çapına, 10-30µm uzunluğuna ve 200-350 m²/g yüzey alanına sahiptir. Adsorpsiyon deneylerinde orijinal ÇDKNT'nin yanında, karşılaştırma yapmak amacıyla modifiye KNT de kullanılmıştır. KNT'nin modifikasyonu için 100 mg KNT, 10 ml sülfürik asit ve 30 ml nitrik asit ile 6 saat boyunca 80°C'deki su banyosunda karıştırılmıştır. Süre sonunda karışıma saf su eklenerek KNT'nin yüzeye fonksiyonellenmemiş kalıntıların ve asitliğin giderilmesi için pH 4,63'e gelene kadar yıkanmış, daha sonra 0,45 µm gözenek çapına sahip filtre kağıdından süzümüştür. Daha sonra filtre kağıdından sıyrılan KNT, 100°C'de kurutulmuş ve deneylerde kullanılmak üzere desikatörde bekletilmiştir. Şekil 1, orijinal ve asit ile modifiye edilmiş KNT'lerin FTIR spektrumlarını göstermektedir. Orijinal KNT (ham) üzerinde herhangi bir fonksiyonel grup gözlenmezken, asit ile modifiye edilmiş KNT'de (mod) üç yeni pik gözlenmektedir (3440 cm⁻¹, 1632 cm⁻¹ ve 1465 cm⁻¹). Bu sonuçlar, orijinal KNT'lerin asit ile modifikasyonu sonucunda başarı ile fonksiyonlaştırıldığını göstermektedir [19].



Şekil 1. Orijinal ve Asit ile Modifiye Edilmiş KNT'lerin FTIR Spektrumları

2.2. Adsorpsiyon Deneyleri

Tüm adsorpsiyon deneyleri, şişe nokta metoduna dayanarak 100 mL cam şişelerde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin pH, 0,1 M NaOH ve HCl ilave edilerek 7'ye ayarlanmıştır. Tüm adsorpsiyon deneyleri 20°C sıcaklıkta ve 100 rpm hızında gerçekleştirilmiştir. Öncelikle orijinal KNT kullanılarak sabit 200 mg/L dozunda ve 2 saatten 7 güne değişen farklı zaman aralıklarında kinetik deneyler yürütülmüştür. Kinetik deneyler 7 günde adsorpsiyonun dengeye ulaştığını göstermiştir. Daha sonra bu denge süresinde 0- 25-50-100-150- 200 ve 250 mg/L dozlarında ham KNT ve modifiye KNT kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Belirlenen temas süresi sonunda KNT partikülleri; 0,45 µm filtre kağıdından süzülerek su fazından ayrılmıştır. Süzülen numunelerin DOM miktarını belirlemek amacıyla UV₂₅₄ absorbansları ve ÇOK konsantrasyonları ölçülmüştür.

2.3. Analitik Metotlar

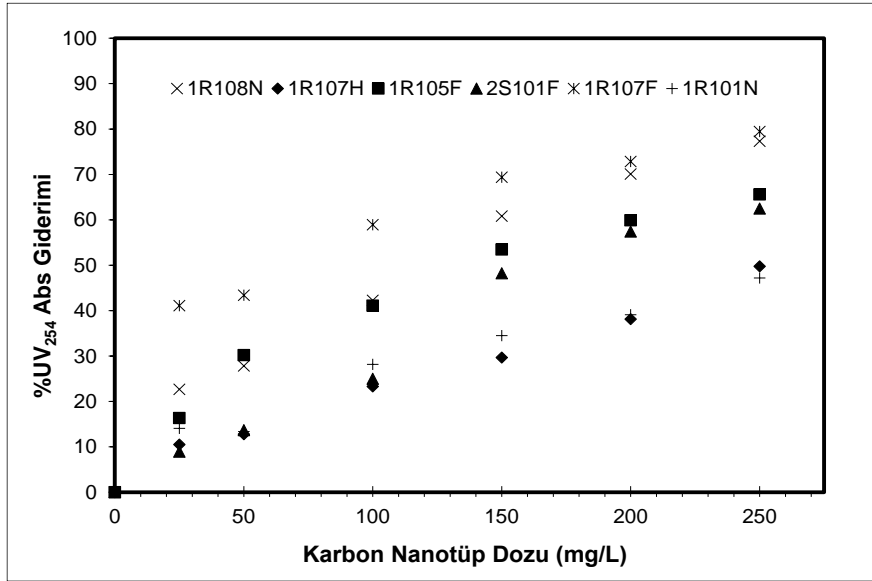
Tüm analizler, standart metotlara uygun olarak gerçekleştirilmiştir [20]. TOK konsantrasyonu, TOC-5000A, Shimadzu TOK analizörü kullanılarak Standart metotlar 5310 B'ye göre belirlenmiştir. UV-vis absorbans, UV-1601, Shimadzu spektrofotometre kullanılarak 254 nm'de ölçülmüştür. pH ölçümleri için VWR marka pH metre kullanılmıştır.

3. Bulgular

3.1. KNT ile sentetik çözeltilerden DOM giderimi

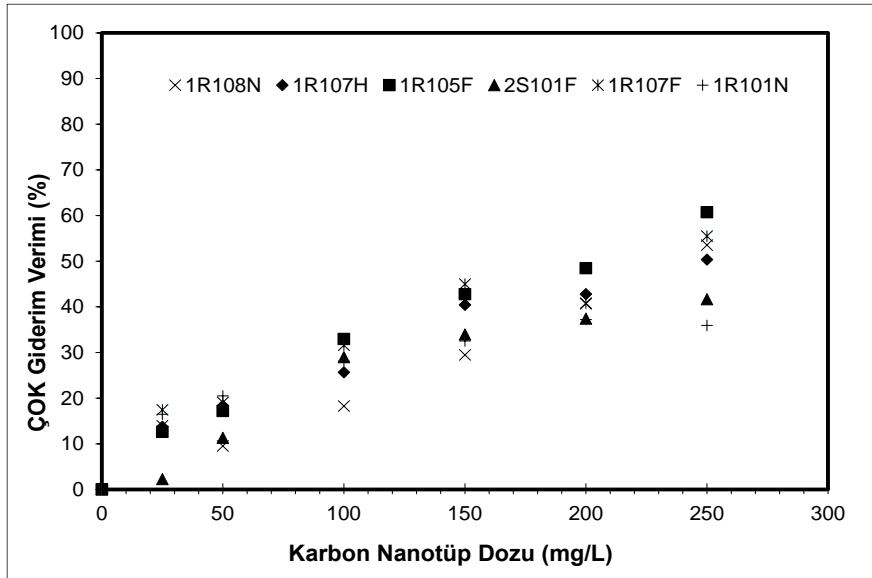
KNT'lerin DOM giderim verimliliği, öncelikle farklı SUVA değerine sahip sentetik sularda test edilmiştir. Şekil 2, yedi günlük temas süresi sonrasında tüm DOM kaynakları için farklı orijinal KNT dozlarında elde edilen UV₂₅₄ absorbans giderim verimlerini göstermektedir. Görüldüğü gibi tüm DOM kaynaklarında KNT dozu arttıkça UV₂₅₄ absorbans giderim verimi de artmıştır. Örneğin, 2S101F çözeltisinde 150 mg/L KNT dozunda %48,2 UV₂₅₄ absorbans giderim verimi elde edilirken 250 mg/L KNT dozunda %62,5 UV₂₅₄ absorbans giderim verimi elde edilmiştir. Bununla birlikte, farklı DOM kaynaklarının etkisi incelendiğinde, en fazla UV₂₅₄ absorbans giderim veriminin 1R107F çözeltisinde elde edildiği görülmektedir. 250 mg/L KNT kullanılarak bu çözeltide elde edilen UV₂₅₄ absorbans giderim verimi %79,5'tir. Karbon nanotüplerin tercihen DOM'un hidrofobik kısımlarını gidermekte etkili oldukları bilinmektedir. 1R107F çözeltisinin yüksek SUVA değeri göz önüne alındığında, diğer çözeltilerden daha fazla asidik fonksiyonel gruplar (karboksilik ve fenolik) ve aromatik bileşenler içermesi beklenmektedir. Bu durum, test edilen çözeltiler arasında en yüksek SUVA değerine sahip olan 1R107F çözeltisinde (SUVA değeri 6,1 L/mg org-C. m) en yüksek giderim verimi elde edilmesini açıklamaktadır. Shimizu vd., [15] tarafından yapılan bir çalışmada da hidrofilik karakteri nedeniyle DOM'un en küçük fraksiyonunun (<0,4 kDa) KNT ile adsorbe edilemediği belirtilmiştir. Benzer şekilde Engel ve Chefetz, [21] tek duvarlı KNT'lere çözülmüş organik maddenin (ÇOM) farklı fraksiyonlarının adsorpsiyon afinitesini araştırmış ve ÇOM'un KNT'lere hidrofobik asit fraksiyonu tarafından baskılandığını, adsorbe edilmemiş ÇOM'un hidrofilik karakterinin arttığını bulmuştur. Bununla birlikte KNT'lerin tercihen UV absorplayan aromatik bileşenleri gidermesi, içme sularının arıtılması sırasında DYÜ kontrolü açısından da bir avantaj sağlamaktadır. Çünkü DOM'un hidrofobik ve aromatik

bileşenleri içeren kısmının DYÜ oluşumundan sorumlu olduğu bilinmektedir. Farklı çözeltilerde elde edilen UV_{254} absorbans giderim verimleri ise, $1R107F > 1R108N > 1R105F > 2S101F > 1R107H > 1R101N$ sırasını takip etmektedir.



Şekil 2. Farklı DOM kaynaklarında orijinal KNT'lerin UV_{254} absorbans giderim verimleri (pH=7; Temas süresi=7 gün; Sıcaklık=20°C; ÇOK=4 mg/L)

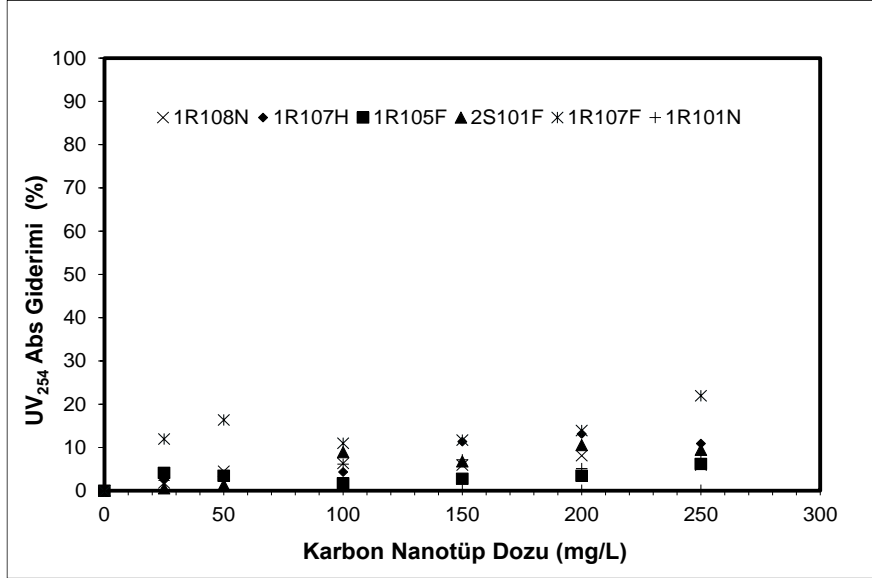
Şekil 3, farklı DOM kaynaklarını temsil eden 6 farklı sentetik çözelti için farklı orijinal KNT dozlarında elde edilen ÇOK giderim verimlerini göstermektedir. Elde edilen ÇOK giderim verimleri, UV_{254} abs giderim verimleriyle tutarlılık göstermektedir. Yüksek SUVA değerine sahip sularda daha yüksek DOM giderim verimi elde edildiği gözlenmiştir. En yüksek ÇOK giderim verimi elde edilen çözelti ise 5,1 L/mg org-C. m SUVA değerine sahip 1R105F çözeltisidir. Bu çözeltide 250 mg/L orijinal KNT kullanılarak %61 ÇOK giderim verimi sağlanmıştır. Ali ve arkadaşları [22] tarafından yürütülen bir çalışmada ise 10 g/L çok duvarlı karbon nanotüp kullanılarak %98 ÇOK giderim verimi elde edilmiştir.



Şekil 3. Farklı DOM kaynaklarında orijinal KNT'lerin ÇOK giderim verimleri ((pH=7; Temas süresi=7 gün; Sıcaklık= 20°C; ÇOK=4 mg/L)

Adsorpsiyon deneyleri orijinal KNT'lerin yanında modifiye KNT'ler ile de yürütülmüştür. Şekil 4, yedi günlük temas süresi sonunda farklı dozlarda modifiye KNT kullanılarak sentetik çözeltilerde elde edilen UV_{254} absorbans giderim verimlerini göstermektedir. Modifiye KNT'ler ile tüm sentetik DOM kaynaklarında elde edilen UV_{254} absorbans giderim verimleri %22'nin altındadır. 6 farklı sentetik çözelti içinde en yüksek giderim 1R107F kodlu sentetik çözeltide olmuştur. 1R107F çözeltisinde 250 mg/L KNT dozunda elde edilen UV_{254} absorbans giderim verimi %22'dir. Bu çözeltiyi 1R107H, 2S101F, 1R101N, 1R105F ve 1R108N çözeltileri takip etmiştir. Bununla

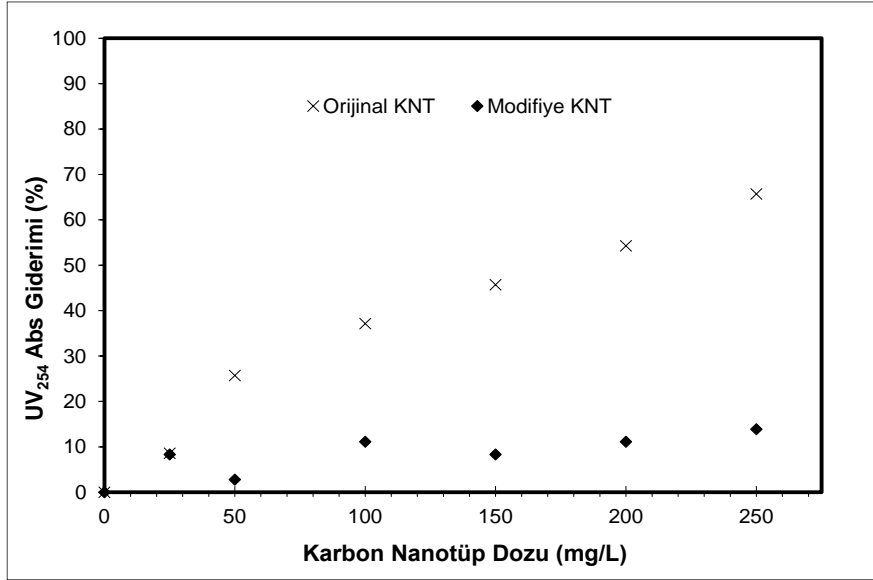
birlikte modifiye KNT'ler, orijinal KNT'ler ile mukayese edildiğinde, modifiye KNT'lerle orijinal KNT'lerden çok daha düşük giderim verimleri elde edildiği görülmüştür. Örneğin 1R107F çözeltisinde 150 mg/L adsorbent dozunda orijinal KNT ile %69,4 UV₂₅₄ absorbans giderim verimi sağlanırken modifiye KNT ile aynı dozda %11,7 giderim verimi elde edilmiştir. Bu durum, asit ile modifikasyon sonucu fonksiyonel grupların oluşmasından kaynaklanmaktadır. Daha önce de belirtildiği gibi, asit ile modifiye edilmiş KNT'lerin FTIR spektrumlarında, ~3440 cm⁻¹, ~1630 cm⁻¹ ve ~1465 cm⁻¹ olmak üzere üç yeni pik ortaya çıkmış ve KNT'lerin asit ile modifikasyonla başarıyla fonksiyonlaştırıldığı desteklenmiştir. Dolayısıyla asitle modifikasyon sonucu yüzeyde oluşan fonksiyonel gruplar [(>C=O) ve (O-C=O)] DOM adsorpsiyonunu azaltmıştır.



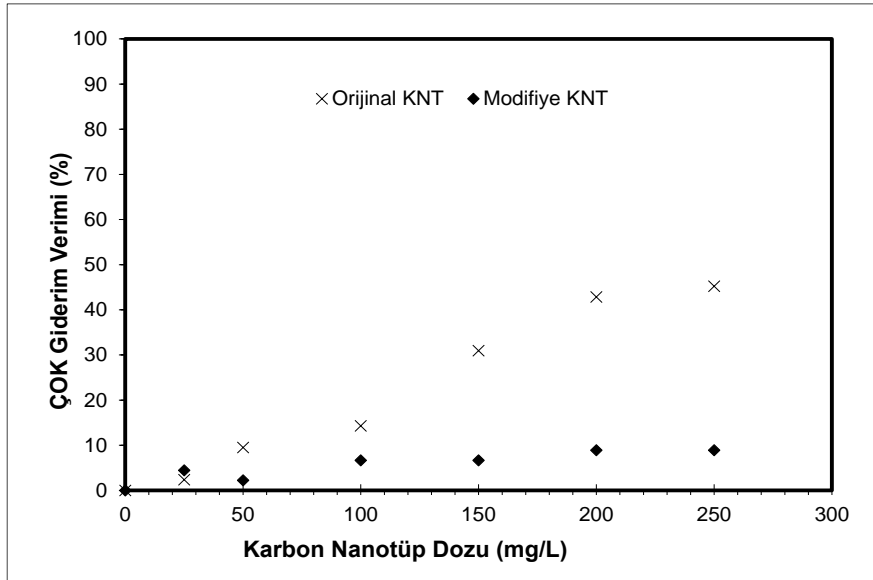
Şekil 4. Farklı DOM kaynaklarında modifiye KNT'lerin UV₂₅₄ absorbans giderim verimleri ((pH=7; Temas süresi=7 gün; Sıcaklık= 20°C; ÇOK=4 mg/L)

3.2. KNT ile doğal sulardan DOM giderimi

Sentetik çözeltilerin yanında doğal su kaynaklarından da KNT'lerin DOM giderme kapasiteleri test edilmiştir. Bunun için düşük SUVA değerine sahip (0,8 L/mg org-C. m) Eğirdir Gölü'nden alınan numuneler kullanılmıştır. Şekil 5, yedi günlük temas süresi sonunda orijinal KNT ve modifiye KNT ile Eğirdir Gölü'nde elde edilen UV₂₅₄ absorbans giderim verimlerini göstermektedir. Sentetik çözeltilere benzer şekilde, Eğirdir Gölü'nde de orijinal KNT ile daha yüksek giderim verimleri sağlanmıştır. Örneğin, 250 mg/L orijinal KNT dozunda %66 UV₂₅₄ absorbans giderim verimi sağlanırken aynı dozda modifiye KNT kullanılarak %14 UV absorbans giderim verimi elde edilmiştir. Şekil 6 ise Eğirdir Gölü'nde orijinal ve modifiye KNT ile elde edilen ÇOK giderim verimlerini göstermektedir. Her iki adsorbent için de ÇOK giderim verimleri, UV₂₅₄ absorbans giderim verimleri ile benzer trendler sergilemektedir. Orijinal KNT ile elde edilen ÇOK giderim verimleri, modifiye KNT ile elde edilen ÇOK giderim verimlerinden yüksektir. 200 mg/L orijinal KNT dozunda %42,9 ÇOK giderimi sağlanırken aynı dozda modifiye KNT ile %8,9 ÇOK giderimi elde edilmiştir. Eğirdir Gölü'nde sağlanan maksimum ÇOK giderim verimi ise %45,2'dir ve 250 mg/L orijinal KNT dozunda elde edilmiştir.



Şekil 5. Eğirdir Gölü'nde orijinal KNT ve modifiye KNT kullanılarak elde edilen UV₂₅₄ absorpsiyon giderim verimleri (pH=7; Temas süresi=7 gün; Sıcaklık= 20°C; ÇOK=4 mg/L)



Şekil 6. Eğirdir Gölü'nde orijinal KNT ve modifiye KNT kullanılarak elde edilen ÇOK giderim verimleri (pH=7; Temas süresi=7 gün; Sıcaklık= 20°C; ÇOK=4 mg/L)

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, farklı DOM karakterine sahip sulardan KNT'ler kullanılarak DOM'un giderimi amaçlanmıştır. Bu amaçla farklı SUVA değerlerine sahip sentetik ve doğal su numunelerinden orijinal/modifiye KNT'lerin DOM giderme etkinlikleri, ÇOK ve UV₂₅₄ absorpsiyon parametreleri açısından araştırılmıştır. Orijinal KNT'lerin modifiye KNT'lere göre DOM gideriminde daha etkili oldukları bulunmuştur. Bu durum, asit ile modifikasyon sonucu, fonksiyonel grupların oluşmasından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, sentetik çözeltilerde en yüksek UV₂₅₄ absorpsiyon giderimi (%79,5), en yüksek SUVA değerine sahip olan "Waskish Peat Fulvic Acid Reference" çözeltilinde bulunmuştur. Bu durum KNT'lerin, DOM'un DYÜ oluşumundan sorumlu olan UV absorptif kısmını gidermekte daha etkili olduğunu göstermektedir. DYÜ oluşumundan sorumlu olan hidrofobik kısmın giderilmesi, KNT'lerin içme suyu arıtılmasında kullanılmasında bir avantaj sağlamaktadır. Bununla birlikte orijinal KNT'ler düşük SUVA değerine sahip Eğirdir Gölü'nden DOM gideriminde de etkinliğini kanıtlamış, %45 ÇOK giderimi, %66 UV₂₅₄ absorpsiyon giderimi sağlanmıştır.

Kaynakça

- [1] Khodabakhshi, A., Farssani, A. R., Sedehi, M., Sadeghi, M. 2023. Removal of Natural Organic Matter (NOM) from Aqueous Solutions by Multi-Walled Carbon Nanotube Modification with Magnetic Fe₃O₄ Nanoparticles, *Hindawi International Journal of Chemical Engineering*, 13 pages.
- [2] Tözüm Akgül, S, Yiğit, N.Ö. 2017. Natural Organic Matter Removal by Catalytic Ozonation using Original and Surface-Modified Waste and Natural Materials. *Desalination and Water Treatment*, 67:117-124.
- [3] Matilainen, A., Gjessing, E., Lahtinen, T., Hed, L., Bhatnagar, A. and Sillanpää, M. 2011. An overview of the methods used in the characterization of natural organic matter (NOM) in relation to drinking water treatment. *Chemosphere*, 83: 1431–1442.
- [4] Edzwald, J.K., Tobiason, J.E. 1999. Enhanced coagulation: USA requirements and a broader view. *Water Science Technology*, 40 (9), 63–70.
- [5] Ateş, N., Kitiş, M., Yetiş, U, 2007. Formation of chlorination by-products in waters with low SUVA-correlations with SUVA and differential UV spectroscopy. *Water Research*, 41, 4139 – 4148.
- [6] Marais, S.S., Ncube E.J., Msagati, T.A.M., Mamba, B.B., Nkambule, T.T.I. 2019. Assessment of trihalomethane (THM) precursors using specific ultraviolet absorbance (SUVA) and molecular size distribution (MSD), *Journal of Water Process Engineering*, 27, 143–151.
- [7] Weishaar, J. L., Aiken, G. R., Bergamaschi, B. A., Fram, M. S., Fujii, R., Mopper, K. 2003. Evaluation of Specific Ultraviolet Absorbance as an Indicator of the Chemical Composition and Reactivity of Dissolved Organic Carbon, *Environmental Science Technology*, 2003, 37, 4702-4708.
- [8] Kaplan Bekaroğlu, Ş. Ş., Ateş, N., Kitiş, M. 2021. Removal of Natural Organic Matter by Steel Slag through Adsorption and Catalytic Oxidation. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(3): 1866-1873. Doi: 10.21597/jist.910865
- [9] Tözüm Akgül, S., Kaplan Bekaroğlu, Ş. Ş., Yiğit, N. Ö. 2019. Adsorpsiyon ve İyon Değişimi Prosesleriyle İçme Sularından Doğal Organik Madde Giderimi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(3). Doi: 10.17482/uumfd.584151
- [10] Jacquin, C., Yu, D., Sander, M., Domagala, K. W., Traber, J., Morgenroth, E., Julian, T. R. (2020). Competitive co-adsorption of bacteriophage MS2 and natural organic matter onto multiwalled carbon nanotubes, *Water Research X*, 9,100058.
- [11] Fiyadh, S. S., AlSaadi, M. A., Jaafar, W. Z., AlOmar, M. K., Fayaed, S. S., Mohd, N. S., Hin, L. S., El-Shafie, A. 2019. Review on heavy metal adsorption processes by carbon nanotubes. *Journal of Cleaner Production* 230 783-793.
- [12] Mashkoo, F., Nasar, A. 2020. Carbon nanotube-based adsorbents for the removal of dyes from waters: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 18 (3), 605–629. Doi:10.1007/s10311-020-00970-6.
- [13] Zhang, S., Shao, T., Karanfil, T. 2011. The effects of dissolved natural organic matter on the adsorption of synthetic organic chemicals by activated carbons and carbon nanotubes, *Water Research*, 45 (2011) 1378–1386.
- [14] Ateia, M., Apul, O.G., Shimizu, Y., Muflihah, A., Yoshimura, C., Karanfil, T. 2017. Elucidating adsorptive fractions of natural organic matter on carbon nanotubes. *Environmental Science and Technology*. 51, 7101-7110.
- [15] Shimizu, Y., Ateia, M., Yoshimura, C. 2018. Natural organic matter undergoes different molecular sieving by adsorption on activated carbon and carbon nanotubes. *Chemosphere* 203, 345-352.
- [16] Wang F., Yao J., Chen H., Yi Z., Xing B., 2013. Sorption of humic acid to functionalized multi-walled carbon nanotubes. *Environmental Pollution*, 180, 1- 6.
- [17] Engel, M., Chefetz, B. 2016. Adsorption and desorption of dissolved organic matter by carbon nanotubes: Effects of solution chemistry, *Environmental Pollution*, 213, 90-98.
- [18] Gupta, V.K., Kumar, R, Nayak, A., et al. 2013. Adsorptive removal of dyes from aqueous solution onto carbon nanotubes: a review. *Adv Colloid Interface Sci*, 193–194: 24–34.
- [19] Göde, Ş. 2015. Adsorpsiyon ve Membran Prosesleriyle Su ve Atıksu Arıtımında Organik Madde Giderimi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 86 s, Isparta.
- [20] APHA (American Public Health Association), *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th ed., American Public Health Association, Washington, D.C., 1998.
- [21] Engel, M., Chefetz, B. 2015. Adsorptive fractionation of dissolved organic matter (DOM) by carbon nanotubes, *Environmental Pollution*, 197, 287-294.
- [22] Ali, P. A., Reza, M. M., Hossein, S. M. 2010. Removal of dissolved organic carbon by multi-walled carbon nanotubes, powdered activated carbon and granular activated carbon, *Research Journal of Chemistry and Environment*, 14 (4).