Dicle Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

mühendislikdergisi
journal of engineering

Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
mühendislikdergisi
Cilt: 16, Sayı: 2, Haziran 2025 ISSN: 1309-8640

Dicle Üniversitesi Adına yayın Sahibi / Privilige Owner
Mehmet Siraç ÖZERDEM

Baş Editör / Editor-in-Chief
Mehmet Siraç ÖZERDEM

Alan Editörleri / Field Editors
Dilek Eren Akyüz
Atilla Gencer Devecioğlu
Mehmet Salih Keskin
İdris Bedirhanoğlu
Bilal Gümüş
Ömer Türk
Fatma Deniz Öztürk
Resul Daş
Yücel Koçyiğit
Hasan Polat
Mehmet Emin Öncü
Fevzi Önen
Halime Abakay Temel
Mehmet Cihat Aydın

Teknik Editör / Technical Editor
Mesut ŞEKER

Yazışma Adresi
Mühendislik Dergisi, Koordinatörlük ve Yayın Bürosu,
Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 21280 Diyarbakır
Telefon : +90-412 241 10 00 (Dahili: 3637)
Elektronik posta : muhendislikdergisi@dicle.edu.tr
web : http://dergipark.gov.tr/dumf, https://duje.dicle.edu.tr/journal/

Dergide yayınlanan yazılar izinsiz başka bir yerde yayınlanamaz veya bildiri olarak sunulamaz.

ISSN Basılı Materyal: 1309-8640
Online ISSN: 2146-4391

Hakem Listesi / *Reviewers List*

Dergimize yayınlanmak üzere gönderilmiş olan makaleleri titiz bir şekilde değerlendiren kıymetli hakem hocalarımıza, değerli katkılarından dolayı teşekkür eder, katkılarının devamını dileriz.

We greatly appreciate the contributions made by the scientists, who worked as reviewers for Dicle University Journal of Engineering (DUJE) and we expect their contributions to the following journal issues.

Süleyman Şahin (Abant İzzet Baysal Üniversitesi)

Mehmet Tanyaş (Maltepe Üniversitesi)

Halil Ibrahim Burgan (Akdeniz Üniversitesi)

Sertaç Atabey (Bitlis Eren Üniversitesi)

Zeynep Aykaç (Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi)

Anil Akdoğan (YTU)

Uğur Eren Yurtcan (Bingöl Üniversitesi)

Muhammet Çınar (Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi)

Mahmut Temel Özdemir (Fırat Üniversitesi)

Serhat Berat Efe (Bandırma 17 Eylül Üniversitesi)

Alper Nabi Akpolat (Marmara Üniversitesi)

Apdulmutalip Şahinaslan (İnönü Üniversitesi)

Ali Serkan Avcı (Batman Üniversitesi)

Fatih Çelik (Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi)

Selçuk Bildik (Nişantaşı Üniversitesi)

Muhammed Yıldırım (Malatya Turgut Özal Üniversitesi)

Erdoğan Aldemir (Batman Üniversitesi)

Şehmus Aslan (Mardin Artuklu Üniversitesi)

Metin Uçurum (Bayburt Üniversitesi)

Gülay Bulut (ITU)

Mesut Gör (Fırat Üniversitesi)

Abdulhalim Aşkan (Samsun Üniversitesi)

Hasan Hüseyin Bilgiç (Necmettin Erbakan Üniversitesi)

Hüseyin Alperen Dağdögen (Fırat Üniversitesi)

Şafak Kılıç (Kayseri Üniversitesi)

Muhammed Onur Kaya (Fırat Üniversitesi)

Halil Şenol (Giresun Üniversitesi)

Mehtap Erşan (Cumhuriyet Üniversitesi)

Şebnem Koltan Yılmaz (İnönü Üniversitesi)

Ömer Aydın (Manisa Celal Bayar Üniversitesi)

Gülsüm Kayabaşı Koru (Ostim Teknik Üniversitesi)

Feyza Altunbey Özbay (Fırat Üniversitesi)

Ecir Uğur Küçüksille (Süleyman Demirel Üniversitesi)

Alev Akıllı El (Bitlis Eren Üniversitesi)

Muhammed Ertuğrul Çeloglu (Bingöl Üniversitesi)

Tuncay Dikici (Dokuz Eylül Üniversitesi)

Işıl Kerti (YTU)

Zülküf Kaya (Erciyes Üniversitesi)

Erdal Uncuoğlu (Erciyes Üniversitesi)

Burak Özdemir (Malatya Turgut Özal Üniversitesi)

Cihan Özel (Fırat Üniversitesi)

Betul Çiçek Ozkan (Fırat Üniversitesi)

Mahmut Fırat (İnönü Üniversitesi)

Evren Turhan (Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi)

Erdinç İkincioğulları (Bingöl Üniversitesi)

Anıl Utku (Munzur Üniversitesi)

Murat Emeç (İstanbul Üniversitesi)

Taki Güler (Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi)

Meryem Göktaş (Bilecik Üniversitesi)

Ali Emre Ulu (Bitlis Eren Üniversitesi)

Burak Yön (Munzur Üniversitesi)

Mehmet Karataş (Munzur Üniversitesi)

Ersin Akyüz (Balıkesir Üniversitesi)

Tuba Tezer (Balıkesir Üniversitesi)

Erkut Sayın (Fırat Üniversitesi)

Abdullah İçen (Fırat Üniversitesi)

Emre Arı (DU)

Cem Haydaroglu (DU)

Ömer Faruk Can (DU)

İçindekiler / *Table of Contents*

Elektrik Elektronik Mühendisliği / Electrical and Electronics Engineering

Online Gıda Perakende Sektöründe Talep Tahmin Analizi (Araştırma Makalesi)
Demand Prediction Analysis in the Online Food Retail Sector (Research Article)
Gülfem Işıklar Alptekin, Utku Bozdoğan **273**

Boya seyreltme ve Winter-Kennedy metotları kullanılarak yapılan hidrolik türbin performans testlerinin karşılaştırmalı analizi-saha çalışması (Araştırma Makalesi)
Comparative analysis of hydraulic turbine performance tests using dye dilution and winter-kennedy methods- a case study (Research Article)
Gökhan Özbek, Sabir Rüstemli **287**

Intelligent Forecasting of Electric Energy Demand with Artificial Neural Networks (Research Article)
Mert Savaş Savar, Mete Eminağaoğlu **301**

Multiple classification of brain tumor images using a new and efficient convolutional neural network-based model (Research Article)
Aynur Sevinç, Buket Kaya, Mehmet Gül **315**

Web Uygulamalarına Yönelik Siber Saldırıların Tespitinde Derin Öğrenme Yöntemleri Kullanılarak Güvenlik Duvarı Uygulamasının Geliştirilmesi (Araştırma Makalesi)
The Development of a Firewall Application Using Deep Learning Methods for Detection of Cyber Attacks on Web Applications (Research Article)
Şengül Bayrak, Alper Karaca, Gerhat Toson, Mehmet Emin Tayfur, Selçuk Yavaş **331**

K-medoids Kümeleme, Boosting ve BERT Algoritmalarıyla Kredi Kartlarındaki Şüpheli Davranışların Tespit Edilmesi (Araştırma Makalesi)
Design of Automatic CNN Architecture with Genetic Algorithm for Apple Leaf Disease Classification (Research Article)
Merve Pınar, Ayşe Berna Altınel **345**

Şüpheli Haberlerin Tespitine Yönelik Derin Öğrenme Tabanlı Haber Teyit Sisteminin Gerçekleştirilmesi (Araştırma Makalesi)
Development of a Deep Learning Based News Verification Ssytem for The Detection of Suspicious News (Research Article)
Nurcan Yardımcı, Burhan Ergen, Hatice Karaoğlu **357**

Enhanced Earthquake Magnitude Prediction Using Hybrid Machine Learning and Deep Learning Models (Research Article)
Kerem Gencer, İnayet Hakkı Çizmeci **369**

Makina Mühendisliği / Mechanical Engineering

Design and Development of Effective Furrower Mounting Bracket Using Topology Optimization (Research Article)
Hilmi Saygın Sucuoğlu, İsmail Bögrekçi, Pınar Demiroğlu, Berkcan Aksoy **377**

Experimental Investıgation Of Flow Dynamics Effects Of Cooling With A Circular Impınging Jet (Research Artilce)
Nevin Çelik, Celal Kıstak, Haydar Eren **385**

The Effectiveness of Advanced Cooling Solutions in Managing the Thermal Performance of Lithium-Ion Batteries: A Numerical Study (Research Article)
Serhat Aydın, Metin Uzun **397**

Savunma Sanayisinde Kullanılan HS 188 Süperalaşımının Oksidasyonu Üzerine Nitrasyon Etkisinin İncelenmesi (Araştırma Makalesi)
Investigation of the Effect of Nitriding on the Oxidation of HS 188 Superalloy Used in the Defense Industry (Research Article)
Merve Kevkir, Nesrin Kelebek, Özge Saltan, Burcu Nilgün Çetiner **411**

Investigation of Burr Formation and Circularity Error in Drilling of PLA Produced at Different Printing Temperatures with Machine Learning-Based Prediction (Research Article)
Ender Emir **421**

Hidrojen yakıt hücreli enerji sistemlerinde kullanılan ara soğutucu manifold giriş yapısının ısıl ve akış davranışına etkisinin sayısal incelemesi (Araştırma Makalesi)
Numerical investigation of the effect of intercooler manifold inlet geometry on thermal and flow behavior in hydrogen fuel cell energy systems (Research Article)
Gülenay A. Kılıç **431**

Maden Mühendisliği / Mining Engineering

Investigation of dewatering of chromite tailings with lignin (Research Article)
Hasan Ali Taner **445**

Bor Cevher Atıklarından Rubidyumun Seçimli Yöntemlerle Kazanımı (Araştırma Makalesi)
Recovery of Rubidium from Boron Ore Wastes by Selective Methods (Research Article)
Ayşegül Yücel, Musa Sarıkaya **451**

İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering

Determining the Overflow of Kalecik Basin Using Fuzzy SMRGT Method (Research Article)
Fatih Şevgin, Zeynel Fuat Toprak, İskender Dölek **461**

Influence of waste textile on the unconfined compressive strength of cohesive soil (Research Article)
Mitat Öztürk **471**

Bodrum Katlı Betonarme Yüksek Yapılarda Yapı-Kazık-Zemin Etkileşiminin Alt Sistem Yaklaşımı ile 2B ve 3B Analiz Yöntemleriyle Değerlendirilmesi (Araştırma Makalesi)
Evaluation of Structure-Pile-Soil Interaction in Basement-Story Reinforced Concrete High-Rise Buildings Using 2D and 3D Analysis Methods with Substructure Approach (Research Article)
Hüseyin Doğan, Taha Taşkıran **479**

Dane Çapı Dağılımının CBR (%) Değerlerine Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması (Araştırma Makalesi)
Experimental Investigation of the Effect of Grain Size Distribution on CBR (%) Values (Research Article)
Murat Gülen, Suat Akbulut, Yaşar Kayan **493**

Hurma çekirdeği tozunun bitümlü bağlayıcıların ortalama karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları üzerindeki etkisinin belirlenmesi (Araştırma Makalesi)
Determination of the effect of palm kernel powder on the average mixing and compaction temperatures of bituminous binders (Research Article)
Ceren Beyza İnce **503**

TBDY 2018'e Göre Sıvılaşma Potansiyeli Analizi için Bir Geoteknik Web Uygulamasının Geliştirilmesi (Araştırma Makalesi)
Development of a Geotechnical Web Application for Liquefaction Potential Analysis According to TEC 2018 (Research Article)
Muhammet Dingil, Betül Keseroğlu, Yakup Türedi, Murat Örnek **511**

İçme Suyu Dağıtım Sistemlerinin Arıza ve Altyapı Rehabilitasyon Önceliği Analizi: Erzurum İli Örneği (Araştırma Makalesi)
Failure and Infrastructure Rehabilitation Priority Analysis of Water Distribution Systems: Erzurum Province Case (Research Article)
Ferdi Canyurt, Reşat Acar, Burak Çırağ **521**

Dicle Nehri Su Kalitesi Parametrelerinin Trend Analizi (Araştırma Makalesi)
Trend Analysis of Tigris River Water Quality Parameters (Research Article)
Mesut Ay, Tamer Bağatur **529**

Farklı Deprem İvmeleri Altında Betonarme Yapıların Zemin Yapı Etkileşimi ile Nümerik Analizi (Araştırma Makalesi)
Numerical Analysis of Reinforced Concrete Structures with Soil-Structure Interaction under Different Earthquake Accelerations (Research Article)
Serhat Yıldız, Mesut Gör **543**

Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi (DÜMF) Mühendislik Dergisi yayınlarında varılan sonuçlar veya fikirlerin sorumluluğunu taşımamaktadır. Üniversite'nin, bu yayında ileri sürülen bilgi, alet, ürün veya işlevin doğruluğu, bütünlüğü, uygunluğu ve kullanılırlığı konusunda bir yüklenimi ve iddiası bulunmamaktadır. Bu nedenle herhangi bir şekilde sorumlu tutulamaz.

Bu yayının herhangi bir kısmı, mühendislik dergisinin yazılı izni olmadıkça kaynak gösterilmeden yayınlanamaz, bilgi saklama sistemine alınamaz veya elektronik, mekanik, fotokopi, kayıt veya başka sistemlerle çoğaltılamaz.

Dicle University
Journal of Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/dumf
duje.dicle.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

Online Gıda Perakende Sektöründe Talep Tahmin Analizi

Demand Prediction Analysis in the Online Food Retail Sector

Gülfem Işıklar Alptekin[1*], Utku Bozdoğan[2]

[1] Galatasaray Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, gisiklar@gsu.edu.tr
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0146-1581

[2] Vanora Yazılım Teknolojileri AŞ, utku.bozdogan@vanoraventures.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8912-9446

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 18 Ekim 2024
Revizyon 13 Şubat 2025
Kabul 12 Nisan 2025
Online 30 Haziran 2025

Anahtar Kelimeler:

Talep tahmini, online gıda sektörü, zaman serisi analizi, Uzun-Kısa Süreli Bellek (LSTM)

ÖZ

Gıda talebinin tahmin edilmesi, özellikle e-ticaret alanında iş süreçlerinin optimizasyonu ve sürdürülebilir kalkınma için büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, öğrenme tabanlı algoritmalar ve zaman serisi analizlerini kullanarak geliştirilen bir talep tahmin sistemi sunulmuştur. Bu sistem, müşteri taleplerini daha doğru bir şekilde öngörmeyi ve perakende şirketlerine stratejik öneriler sunmayı amaçlamaktadır. Yapılan sayısal uygulamalar, Türkiye'deki bir gıda perakende şirketinin son yedi yıllık verileri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, özellikle izolasyon ormanı, aglomeratif ve spektral kümeleme, Uzun Kısa Süreli Bellek ve Ekstrem Gradyan Arttırma gibi yöntemler kullanılmıştır. Geliştirilen modeller, satış verilerinin doğru tahmin edilmesine ve stok yönetimi gibi kritik iş süreçlerine önemli katkılar sağlamaktadır. Sonuçlar, özellikle pandemi sürecinde ve mevsimsel etkilerin dikkate alındığı durumlarda gıda talebinin daha etkin bir şekilde yönetilmesine olanak tanımaktadır.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 18 October 2024
Received in revised form 13 February 2025
Accepted 12 April 2025
Available online 30 June 2025

Keywords:

Demand prediction, online food sector, time series analysis, Long Short-Term Memory (LSTM)

DOI: 10.24012/dumf.1569799

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

Predicting food demand is of great importance, especially for optimizing business processes and achieving sustainable development in the e-commerce sector. This study presents a demand forecasting system developed using learning-based algorithms and time series analysis. The system aims to accurately predict customer demands and provide strategic recommendations to retail companies. Numerical applications have been conducted using data from the past seven years of a food retail company in Turkey. Specifically, methods such as isolation forest, agglomerative and spectral clustering, Long Short-Term Memory (LSTM), and Extreme Gradient Boosting (XGBoost) have been utilized. The developed models significantly contribute to accurate prediction of sales data and critical business processes like inventory management. The results facilitate more effective management of food demand, particularly during the pandemic and in scenarios where seasonal effects are considered.

Giriş

Gıda talep tahmini hem işletmeler hem de sürdürülebilir kalkınma açısından kritik bir meseledir. Küresel gıda ve içecek e-ticaret pazarının büyüklüğü, 2022'de 57,09 milyar $'dan 2023'te %22,2'lik bir yıllık büyüme oranı ile 69,77 milyar $'a çıkmış, 2027'de ise %19,1'lik bir yıllık büyüme oranı ile 140,42 milyar $'a çıkması beklenmektedir (Food And Beverages ECommerce Global Market Report 2023).

Türkiye'de ise 2019 – 2022 yılları arasında ülkenin e-ticaret hacmi yüzde 80,6 oranında oldukça yüksek bir yıllık bileşik büyüme kaydetmiştir. Euromonitor tahminlerine göre Türkiye'deki e-ticaret hacmi, 2020- 2025 yılları arasında yüzde 23,7 yıllık bileşik büyüme oranı ile 2025'te mevcut hacminin 2,3 katı bir büyüklüğe ulaşacaktır.

PwC araştırması "Türkiye'deki KOBİ'lerin E-Ticaret Görünümü" raporunda 2022 yılında Türkiye'de gıda ve süpermarket e-ticaret hacmi toplamda %3.3'lük bir pazar dilimine sahiptir. Globale bakıldığında bu oran %28 olarak görülmektedir. Türkiye'nin gıda ve süpermarket e-ticareti açısından büyüme açısından hala doygunluğa ulaşacak alanı bulunmaktadır. Günümüzde veri analizi, iş süreçlerini sürekli iyileştirmek ve stratejik kararlar almak adına önemli bir araç haline gelmiştir. Özellikle perakende sektöründe satış verilerinin doğru bir şekilde analiz edilmesi, taleplerin öngörülmesi ve stok yönetimi gibi süreçlerin etkinliği açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Bu makalede, e-ticaret perakende şirketlerinin karşılaştığı operasyonel zorluklara yönelik kullanılabilecek bir talep tahmin sistemi geliştirilmektedir Öğrenme esaslı algoritmalar ve zaman serisi analizini esas alan bu yazılımın temel amacı, müşteri taleplerini daha hassas bir şekilde tahmin etmek ve stratejik öneriler sunmaktır. Sayısal uygulamalar, gıda perakende sektöründe çalışan özel bir şirketin son yedi senelik verileri ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada gıda verileri özelinde çalışılsa da yazılımın kapsamı genişleterek, e-ticarette faaliyet gösteren farklı sektörler için de rahatça uyarlanabilir. Seçilen yöntemler, özellikle son yıllarda online gıda verisi üzerinde çalışan yayınlara odaklanarak yapılan akademik literatür ve dergi incelemesi sonucu belirlenmiştir.

Bu çalışma, Ocak 2016 ile Eylül 2023 tarihleri arasındaki gıda satış verilerini inceleyerek, satış trendlerini analiz etmeyi ve geleceğe yönelik satış miktarlarının tahmin edilebilmesi için uygun modellemeleri geliştirmeyi amaçlamaktadır. Veri kümesi, kişisel verilerden arındırılmış ve anonimleştirilmiş bir yapıdadır. Veriyi daha iyi anlamak amacıyla temel istatistiki analizler gerçekleştirilmiş, siparişlerin tarihsel dağılımları, ürün gruplarının satış performansları ve satış miktarlarındaki dönemsel değişiklikler ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Özellikle pandemi sürecinin satışlar üzerindeki etkisi ve farklı ürün gruplarının mevsimsel eğilimleri, çalışmada dikkat çeken başlıca unsurlar arasında yer almaktadır.

Verinin işlenmesi sırasında, eksik ve mükerrer kayıtların giderilmesi için ön işleme adımları uygulanmış, bu sayede temiz ve analiz edilmeye uygun bir veri kümesi elde edilmiştir. Ayrıca, taze gıda ürünleri gibi hızla bozulabilen ürünlerin satışlarına yönelik özel bir ilgi gösterilmiştir. Çalışmanın temel amacı, bu veri kümesi üzerinde çeşitli zaman serisi analizleri ve makine öğrenimi teknikleri kullanarak, satışların doğru bir şekilde öngörülebilmesi ve stok yönetimi gibi operasyonel süreçlere katkı sağlayacak modeller geliştirmektir. Makalede, anomali tespiti için izolasyon ormanı (*isolation forest*), veriyi kümelere ayırırken boyut düşürme amaçlı ana bileşen analizi (PCA-*Principal Component Analysis)*, TSNE, UMAP ve kümeleme amacıyla *Kmeans*, Gauss karışım modelleri (*Gaussian mixture models*), DBSCAN, aglomeratif ve spektral kümeleme algoritmaları uygulanmıştır. Sonrasında tahmin için Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM - *Long Short-Term Memory*) ve Ekstrem Gradyan Arttırma (XGBoost - *Extreme Gradient Boosting*) modellerinden faydalanılmıştır.

Makalenin bir sonraki bölümünde, akademik literatürdeki benzer çalışmalardan bahsettikten sonra, kullanılan yöntemler kısaca tanıtılacaktır. Ardından ayrıntılı şekilde veri ön analiz, işlenmesi ve sonuçlar verilerek, en son bölümde elde edilen çıktılar tartışılacaktır.

Literatür Taraması

Online gıda perakende sektöründe öğrenme tabanlı modellerin kullanılması, gıda talebinin tahmin edilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu modeller, sürdürülebilir kalkınmayı ve iş süreçlerinin optimizasyonunu destekler. Talep tahmini konusunda akademik literatürde son derece fazla çalışma olsa da konu ile en yakından ilgili çalışmalar incelendiğinde, aşağıdaki örneklerle karşılaşılmıştır:

Polonya'da gerçekleştirilen bir araştırma, gıda talebini tahmin etmek için doğrusal olmayan otoregresif dışsal sinir ağı (NARXNN) kullanmıştır [1]. Bu çalışmada, gıda atıklarını azaltmayı ve geleneksel RNN'lerden daha iyi tahminler sağlayan NARXNN'nin avantajlarını kullanmayı hedeflemişlerdir. Çalışmada kullanılan eğitim veri kümesi, sinir ağına eğitim sırasında sunulan talep değerlerini içeren bir zaman serisinden oluşmuştur. Model performansı, MAE (*Mean Absolute Error*), MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) ve RMSE (*Root Mean Square Error*)'nin en düşük değerleri ile belirlenme katsayısı (R-kare) en yüksek değeri esas alınarak analiz edilmiştir. Çalışmanın bulgularına dayanarak, yapay zekâ tabanlı NARX modelleri kullanılarak çok doğru gıda talebi tahminlerinin yapılabileceği sonucuna varılmıştır.

Bir diğer çalışma, Genpact tarafından yayınlanan '*Food Demand Forecasting*' veri kümesini kullanarak sipariş sayılarını tahmin etmeyi amaçlamıştır [2]. Bu çalışmada, talebi etkileyen çeşitli faktörler analiz edilmiş, etkili özellikler çıkarılmış ve yedi farklı regresör karşılaştırılmıştır. Bu regresörler arasında, rastgele orman regresörü, *Cat Boost* regresör, aşırı radyan artırma regresörü, gradyan artırma regresörü, hafif gradyan artırma makinesi regresörü, uzun kısa süreli bellek ve iki yönlü LSTM regresörleri kullanılmıştır. MAE ve RMSE değerlerine bakıldığında, rastgele orman regresörü ile doğru bir tahmin yapılabileceğini kanıtlamışlardır.

Türkiye'de yapılan bir araştırma, öğle yemeği gibi belirli zaman dilimlerinde ön rezervasyon yapılmadan yoğun gıda talebini tahmin etmek üzere makine öğrenimi tabanlı tahmin modelleri kullanmış ve bu modeller arasında yapay sinir ağları, Gauss süreci regresyonları, destek vektör

regresyonları ve karar ağaçları yer almıştır [3]. Çalışma, yöntem çeşitliliği, tahmin performansı ve uygulama kapsamı bakımından önemli bir katkı sunmuştur. En iyi performans gösteren model, mükemmel tahmin metrikleri sağlayan *ensemble* karar ağacı modeli olmuştur; MSE (*Mean Square Error*) 0.51, MAE 0.50 ve R-kare değeri 0,96 olarak ölçülmüştür (Aci ve Yergök, 2023).

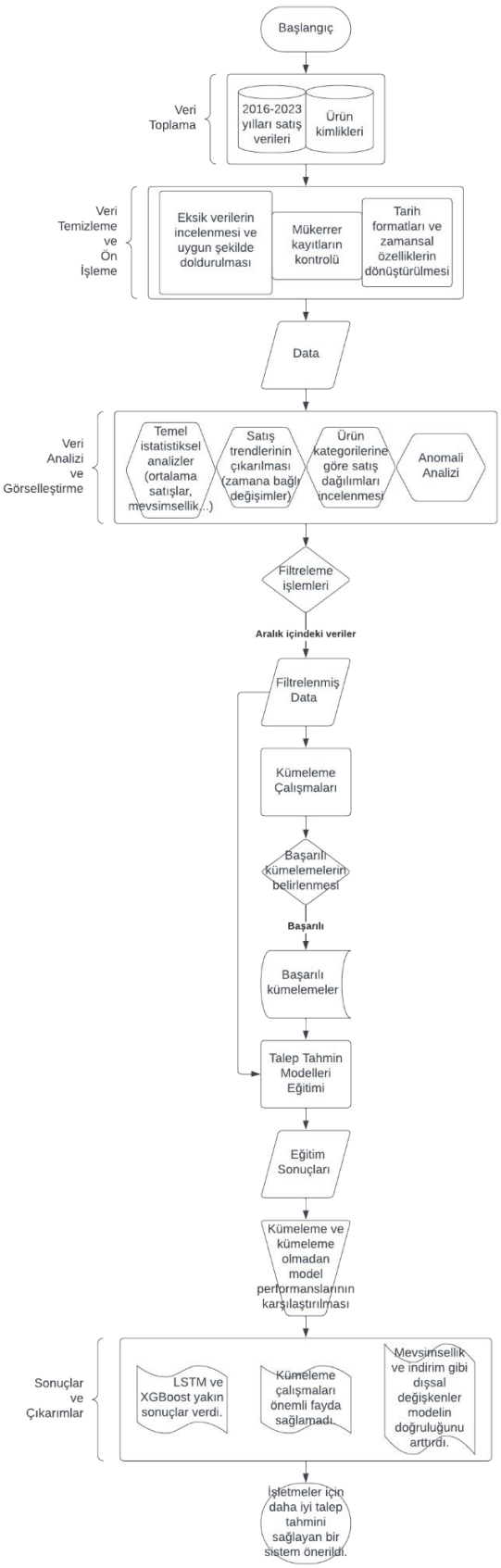
Kullanılan Yöntemler

Bu çalışmada başvurulan üç temel yöntem aşağıda detaylandırılmıştır:

İzolasyon Ormanı (*Isolation Forest*) [4]: Özellikle anomali tespiti için tasarlanmış olan bu algoritma, veri kümesindeki anormal verilerin sayıca az ve özellikleri itibariyle farklı olmasından yararlanır. Anormal veriler, normal verilere kıyasla daha kolay izole edilebilir. Algoritma, rastgele bir özellik seçer ve bu özelliğin değer aralığı içinde rastgele bir bölme noktası belirler. Bu bölme işlemi, her düğümün bir özellik üzerinde bir bölünmeyi temsil ettiği bir ağaç yapısı oluşturarak yinelemeli olarak devam eder. Anormal veriler, farklılıkları nedeniyle genellikle ağacın daha erken dallarında izole edilir, bu da onların kökten yaprağa olan mesafesinin daha kısa olduğu anlamına gelir. Aksine, normal veriler daha yaygın ve birbirine benzer oldukları için izole edilmeleri daha fazla bölünme (daha uzun yollar) gerektirir. Ormandaki ağaçların çoğunun kısa yollarla ulaştığı veri noktaları bu şekilde anormal kabul edilir. Bu yöntem, tek ve çok değişkenli veriler üzerinde etkili olup, modelin beklenen anormallik oranını da ayarlayabilme imkânı sunar.

Aglomeratif kümeleme: Hiyerarşik kümelemenin bir türü olan aglomeratif kümeleme, her gözlemi ayrı bir küme olarak kabul ederek başlar ve benzer kümeleri birleştirerek ilerler [5]. Bu yöntem, 'aşağıdan yukarıya' yaklaşımı benimser; yani her gözlem önce kendi başına bir küme olarak değerlendirilir, ardından en benzer iki küme birleştirilir. Bu süreç, tek bir kümeye ulaşana kadar devam eder. Kümelerin birleştirilmesi sırasında farklı bağlantı (*linkage*) yöntemleri ve uzaklık ölçütleri kullanılabilir. Aglomeratif kümeleme, önceden belirlenmiş bir küme sayısını gerektirmez ve karmaşık hiyerarşik yapıları başarıyla ele alabilir. Önceden küme sayısının belirtilmesini gerektirmediği ve kendi içinde hiyerarşik yapılarda başarılı olduğu için tercih edilmiştir.

Spektral kümeleme [6]: Veri kümesindeki benzerlikler üzerinden oluşturulan matrislerin özdeğer (*eigenvalue*) ve özvektörlerini (*eigenvector*) kullanan güçlü ve esnek bir kümeleme yöntemidir. Geleneksel kümeleme yöntemlerinin başarısız olduğu karmaşık geometrilere sahip veri kümelerini etkin bir şekilde ayırt edebilir. Spektral kümeleme, verileri özdeğer bilgisini kullanarak daha düşük boyutlu bir uzaya indirger ve ardından bu yeni temsilde K-means gibi bir kümeleme algoritması uygular. Bu yöntem, özellikle geleneksel metotlarla zorlanılan veri kümelerinde daha belirgin kümeleme sonuçları elde etmek için kullanılır. Çalışmada kullanılan yöntemler ve genel akış, Şekil 1'de özetlenmiştir.



Şekil 1. Kullanılan metodoloji ve akışı

Veri Ön Analizi

Satış Verileri

Makaledeki sayısal analizler için, Ocak 2016 ile Eylül 2023 tarihleri arasındaki yedi yıllık satış verisi kullanılmıştır. Veri kümesinin ham versiyonunda 2.699.563 adet sipariş kaydı bulunmaktadır. Bu veriler kişisel bilgilerden arındırılmış ve anonimleştirilmiştir. Analizlere başlamadan önce, veriyi daha iyi anlamak amacıyla, araştırmaya bazı temel istatistiki analizler ile başlanmıştır. Analizleri daha iyi anlamak için, ürün ve satışlarla ilgili özellikler şu şekilde listelenebilir:

Sipariş Numarası: Siparişleri birbirinden ayıran sipariş numarası bilgisi.

Tarih: Siparişin verildiği tarih bilgisi (yıl/ay/gün saat/dakika/saniye formatında).

Gıda Kimliği: Satışı yapılan her gıda maddesinin kendine özgü, tekil, tam sayı değeri alan numarası.

Ürün Adı: Ürünün kendine özgü, tekil, ismi.

Sipariş Miktarı: Sipariş verilen ürün miktarı (adet).

Seçilen Miktar: Sipariş için ayrılan ürün miktarı (adet).

Gerçek Ağırlık: Bir üründen sipariş için ayrılan miktarı belirten rasyonel sayı (kilogram).

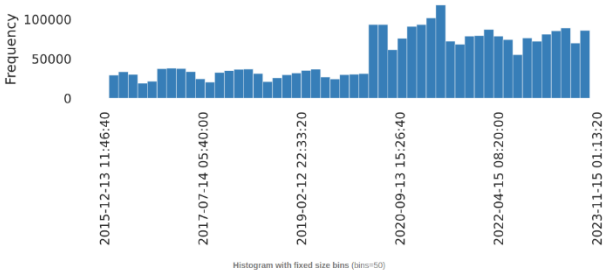
Vergili Ürün Fiyatı: Ürünün vergili birim fiyatı (TL).

Ürün Fiyatı: Ürünün birim fiyatı (TL).

Tahmini Ağırlık: Tüm ürünler için mevcut olmayan, tahmini ürün ağırlık bilgisi (gram).

Toplama Türü: Paketli/kutulu satılan ürünleri, tartılan ve tartılmayan ürünleri, adet olarak satılan veya kahvaltılık ürünleri filtrelemek için kullanılan kategori numarası. Buna göre numaralar aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

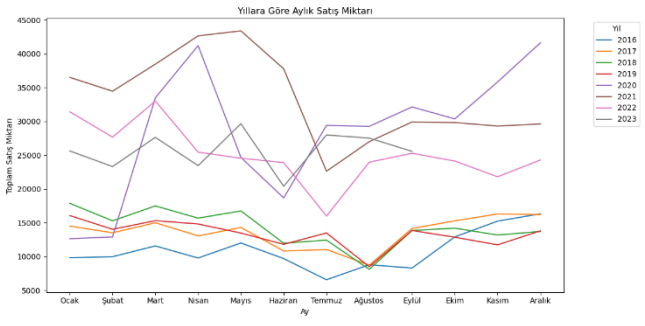
1. Paketli ürün
2. Tartılmadan adetle satılan ürün
3. Tartılarak satılan çok adetli ürünler
4. Tartılarak satılan tek adet ürünler
5. Kahvaltılık ürünler
6. Et ürünleri



Şekil 2. Satışların seneler içindeki değişimi

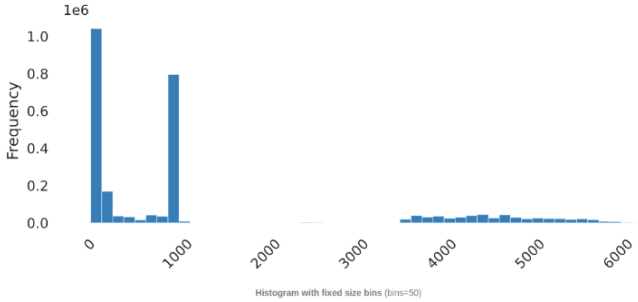
Şekil 2'de görüldüğü üzere, pandeminin etkisini gösterdiği 2020 yılının mart ayından itibaren, satış kayıtları sayısında belirgin bir artış gözlenmektedir. Bu durum, gıda perakendeciliği yapan şirketlerin stok durumuna dair beklentilerini daha kesin şekilde ölçümleyebilmeleri ihtiyacını da beraberinde artırmıştır.

2016-2023 yılları arasında aylık bazda toplam ürün satış miktarları değişimleri Şekil 3'te gösterilmiştir. Bu grafikte de 2020 yılının Mart ayından itibaren (pandemi başlangıcı) belirgin artış gözlenmekte ve ilerleyen zamanlarda önceki seviyelere bir gerileme gözlemlenmemektedir.



Şekil 3. Satışların yıllara göre aylık bazda değişimi

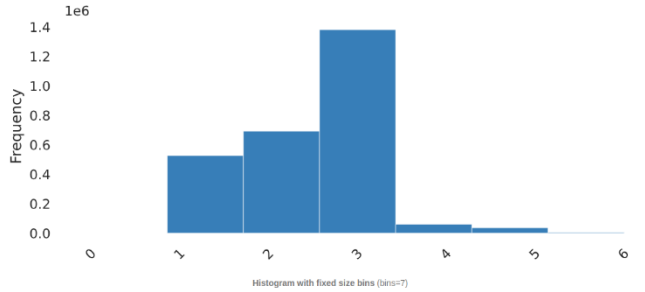
Şekil 4'te *Gıda Kimliği*'ne göre ürünlerin satışlarına ait dağılım görülmek istenmiştir. Ürünlerin gıda kimlik ve satışlarının dengeli dağılmadığı saptanmıştır.



Şekil 4. *Gıda Kimliği* uyarınca ürün satış miktarları

Şekil 5'te, *Ürün Adı* bilgilerine bakarak bir etiket bulutu çizilmiştir. Burada, 'organik' ibaresinin (%8.3) en önemli yeri tuttuğu gözlenmiştir.

Şekil 5. *Ürün Adı* bilgilerine bakılarak çizilen etiket bulutu



Şekil 6. *Toplama Türü* uyarınca ürünlerin satış dağılımları

Şekil 6'da *Toplama Türü* bilgilerine bakılarak, ürünlerin satışlarının dağılımlarına bakılmıştır. Toplama türüne göre ürünlerin satış dağılımının dengeli olmadığı görülmüştür. Toplama türündeki değerlerin ayrıntılı açıklaması şu şekilde verilebilir:

- 6, tartılan balık ürünleri (ör: levrek, çipura)
- 5, tartılan ve çoklu satılmayan ürünler (ör: kırmızı lahana, beyaz lahana, tavuk bonfile, bal, gouda peyniri)
- 4, tartılan ve adetle satılan ürünler (ör:kavun, karpuz, paket kiraz, paket piliç)
- 3, tartılan ve çoklu satılan ürünler (ör:patlıcan, salatalık, kuru soğan)
- 2, tartılmayan ve adetle satılan ürünler (ör:karnabahar, kıvırcık, yufka, simit)
- 1, paketli ürünler (ör:organik domates kg, ceviz içi, kaju fıstık, hindistan cevizi sütü)
- 0, test ürünü olup toplamda 3 kayıt bulundurmaktadır.

Talep tahmini yaparken ana hedef, çabuk bozulmaları dolayısıyla zararı önlemek için başarılı talep tahmini gerektiren taze gıda ürünlerini öncelemektir. Bu ürünler de çoğunlukla 3 numaralı toplama türüne ait olmakla beraber, diğer türlerde de ilgili ürünler bulunduğu görülmektedir.

Eksik ve Mükerrer Kayıtlar

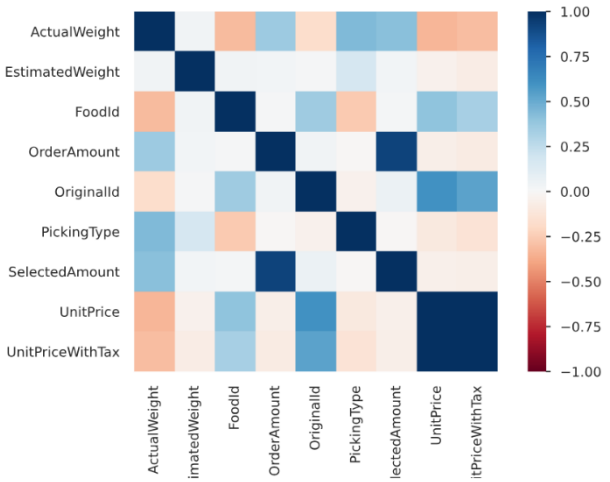
Veri kümesinde yalnızca 43 adet mükerrer kaydın bulunduğu, bazı ürünlerde birden çok sipariş verildiğinde kaydın bu şekilde tutulduğu tespit edilmiş, işlem yapılmamıştır.

Veri kümesindeki alanlardan yalnızca:

1. *Tahmini Ağırlık* değerlerinin %64,7 oranında eksik olduğu belirlendi. Bu sebeple, bu değer sadece filtreleme amacıyla kullanıldı.
2. *Vergili Ürün Fiyatı* değerlerinin 29 Temmuz 2019 tarihinden itibaren saklandığı, dolayısıyla %26,2 oranında eksik olduğu belirlendi. Bu sebeple, onun yerine eksiksiz olan *Ürün Fiyatı* kullanılması tercih edildi.

Bazı alanların aldığı değerlere göre, şöyle anlamlar/ kurallar çıkarılabileceği tespit edildi:

- *Sipariş Numarası* 0 değilken *Seçilen Miktarı*'nın 0 olması ürün stoğunun bittiğine işaret eder.
- *Gerçek Ağırlık* tam olarak 1 ve *Tahmini Ağırlık* eksik ise, ürün taze gıda ürünü değildir.
- Aynı siparişte veya aynı gün içerisinde bir ürünün birden fazla *Ürün Fiyatı* ile bulunması o üründe indirime işaret eder.



Şekil 7. Verideki sayısal alanlara ait korelasyon ısı haritası

Verideki sayısal alanların korelasyon ısı haritası Şekil 7'de verilmiştir. Ciddi korelasyonlar, çoğunlukla zaten birbirleriyle ilişkili olan alanlarda görülmüştür: *Ürün Fiyatı* (*UnitPrice*) ve *Vergili Ürün Fiyatı* (*UnitPriceWithTax*), *Sipariş Miktarı* (*OrderAmount*) ve *Seçilen Miktar* (*SelectedAmount*) gibi. *Sipariş Numarası* (*OriginalId*) ile *Ürün Fiyatı* ve *Vergili Ürün Fiyatı* alanlarının korelasyonu, zaman içerisinde hem verilen siparişler dolayısıyla sipariş numarasının artması hem de ürün fiyatlarının artmasıyla açıklanabilir. Satış ile ilgili veride, 3346 farklı *Gıda Kimliği* (*FoodId*) mevcuttur.

Ürün Verileri

Ürünlerin *Gıda Kimliği* bilgisine haritalandırılabilen bir alan üzerinden, ürünlere ait 'Kategori' ve 'Alt Kategori' bilgilerinin bulunduğu başka bir veri kümesine erişilmiştir. Bu veri kümesinde, 5287 farklı *Gıda Kimliği* mevcuttur.

Bu veri kümesinde 12 farklı kategori ve 54 farklı alt kategori bulunmaktadır (Şekil 8). Kategoriler ve ilgili alt kategoriler aşağıdaki gibi listelenebilir:

Ekmek ve Unlu Mamüller: Ekmek - Sos - Yufka - Makarna, Mantı & Un - Çikolata & Tatlı - Kuru Gıdalar
Et, Tavuk, Balık: Et & Et Ürünleri: Tavuk - Balık & Deniz Ürünleri - Sos
Kahvaltılıklar: Peynir - Yumurta - Reçel - Yoğurt - Süt Ürünleri - İçecekler - Ekmek - Organik Kahvaltılıklar - Ezme
Et & Et Ürünleri: Sebzeler - Pekmez,Tahin & Sirke - Kahvaltılıklar - Zeytinyağı - Sos - Granola - Çikolata & Tatlı
Kuru Gıdalar: Kuruyemiş - Çay & Kahve - Baharat & Tuz - Bakliyat - Erişte & Tarhana - Makarna, Mantı & Un - Ezme - Çikolata & Tatlı - Sos - Glutensiz Ürünler - İçecekler - Pekmez,Tahin & Sirke - Anne & Çocuk - Ev Yemekleri - Kuru Gıdalar - Granola - Ekmek - Süt Ürünleri
Light Ürünler: Light Ürünler - Ekmek - Granola
Meyveler: Meyveler - Reçel
Organik Ürünler: Organik Sebzeler- Organik Kahvaltılıklar - Organik Et, Tavuk - Organik Bal, Pekmez & Tahin - Ezme - Organik Çay & Kahve - Organik Zeytin & Zeytinyağı - Organik Bakliyatlar - Organik Makarna, Mantı, Un - Organik Salça, Sirke & Soslar - Organik Kuruyemişler

- Organik Baharat & Tuz - Organik Meyveler - Yoğurt - Organik Çikolata & Tatlı - İçecekler - Granola - Çikolata & Tatlı

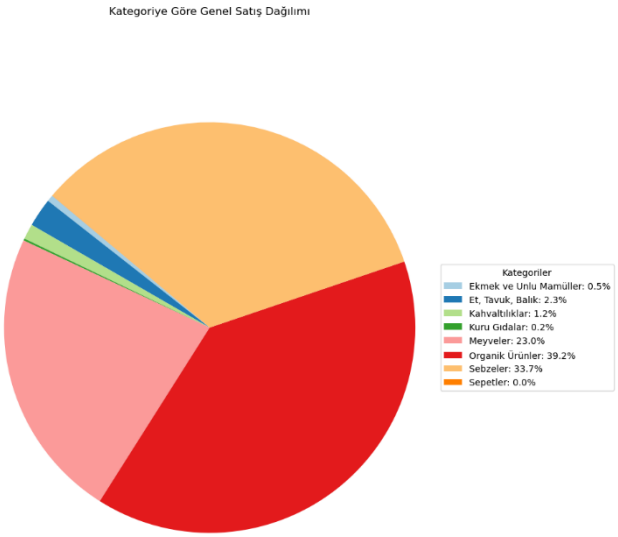
Salça, Sirke & Soslar: Salça: Sirke - Sos - Turşu - İçecekler - Ezme - Sebzeler

Sebzeler: Sebzeler - Sos - Organik Sebzeler - Bakliyat - Ezme

Sepetler: Et & Et Ürünleri - Özel Sepetler - Ramazan Sepeti - Sepetler - Yılbaşı Sepeti - Reçel - Sebzeler - Granola - Salça

Temizlik ve Kişisel Bakım: Kişisel Bakım - Temizlik

Zeytin & Zeytinyağı: Zeytinyağı - Zeytin - Ezme



Şekil 8. Tüm satışların ürün kategorilerine göre dağılımı

Kategorilerle aynı isme sahip alt kategoriler, kategoriler arasında ortak alt kategoriler, ayrıca aynı kategorinin organik ve organik olmayan versiyonları olduğu görülmektedir. Eldeki satış verisinde mevcut olan ürünler üzerinden ürün verisi birleştirildiğinde 8 farklı kategori ve 27 farklı alt kategori görülmektedir. Bunlar, aşağıdaki gibidir:

Ekmek ve Unlu Mamüller: Ekmek - Yufka - Çikolata & Tatlı

Et, Tavuk, Balık: Et & Et Ürünleri - Tavuk - Balık & Deniz Ürünleri

Kahvaltılıklar: Peynir - Yumurta - Yoğurt - Süt Ürünleri - Et & Et Ürünleri - Sebzeler - Reçel - Kahvaltılıklar - Granola - Ekmek - Çikolata & Tatlı

Kuru Gıdalar: Kuruyemiş - Makarna, Mantı & Un - Kuru Gıdalar - Ev Yemekleri - Çikolata & Tatlı - İçecekler

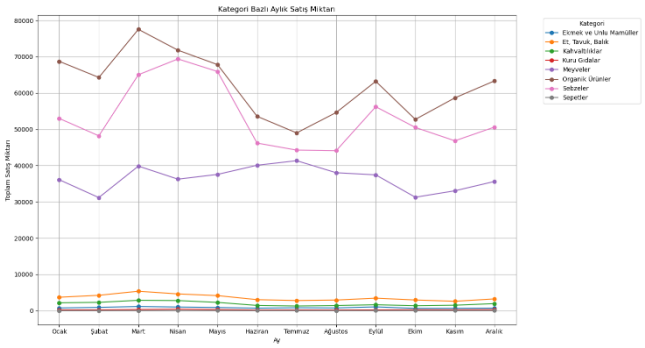
Meyveler: Meyveler

Organik Ürünler: Organik Sebzeler - Organik Meyveler - Organik Et, Tavuk - Organik Kahvaltılıklar - Organik Bal, Pekmez & Tahin

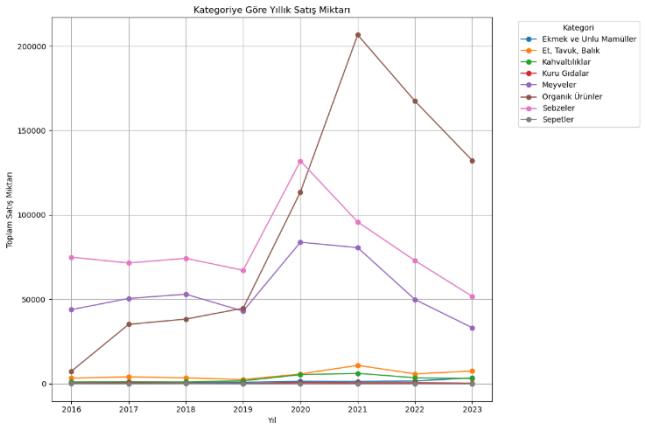
Sebzeler: Sebzeler - Bakliyat

Sepetler: Özel Sepetler

Ürünlerin kategori bazlı aylık satışları incelenmiş, satışların meyve, sebze ve organik ürünlerde yoğunlaştığı ve satışların aylar üzerinden mevsimselliği Şekil 9'da sunulmuştur. Ürünlerin kategori bazlı yıllık satış miktarları ise Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 9. Ürünlerin kategori bazlı aylık satışları



Şekil 10. Ürünlerin kategori bazlı yıllık satışları

Anomali İncelemesi

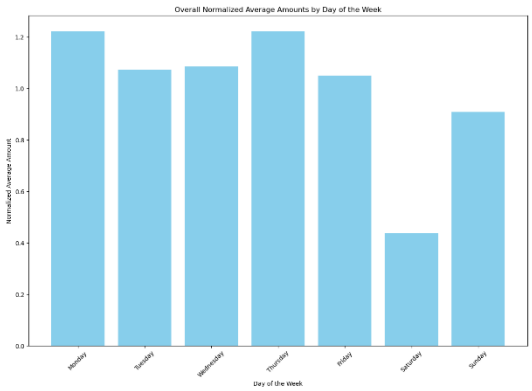
Satışlarda anomali incelemesi, tüm ürünlerin satış verisi üzerinden İzolasyon Ormanı tekniği kullanılarak yapılmıştır. Bu analiz sonucunda anomali olarak işaretlenen günlük satışlara rastlansa da, bunlar incelendiğinde sezon içerisinde ve genelde pandemi zamanında gerçekleştikleri görülmüştür. Kayıtlar incelendiğinde, bunların hatalı girdiler olduklarından şüphelenilmemiştir.

Bu inceleme sırasında ürün satışlarının çoğunlukla mevsimsel ve miktarlarının değişken olduğu, satışlar arasında mevsimsellikten ötürü veya ürünün satılmadığı yıl veya yılların olabildiği, bazı ürünlerin satışının sonlandığı ve bazı yeni ürünlerin de satılmaya başlandığı görülmüştür.

Eldeki veri kümesinin kapsadığı 2016-2023 yıllarına ait, talebe etkisi olabileceği düşünülen önemli tatil günleri, eklenen/bağlanan tatil günleri ve hafta sonları da dahil olmak üzere özel olarak tanımlanabilecek günler belirlendi. Satış verisi üzerindeki anomali incelemesine eklenerek anomali oluşturan günlerin bu günlerle kesişip kesişmediği incelendi. Ürünler mevsimsellikleri içinde gözlendiklerinde, anomaliye dahil olan bu günlerin kendilerine özgü sebeplerle satışlara etki ettiğine dair bir bulguya rastlanmadı.

Haftanın günlerinin satışlar üzerindeki etkisi üzerine ayrı bir çalışma yapılmış ve her ürün için ayrı ayrı ve tüm ürünler birlikte olmak üzere ürünlerin satışlarının ne kadarının ne zaman gerçekleştiği incelenmiştir. Satış verisindeki tüm ürünler için yapılan bu çalışmada incelenen grafikler çok

fazla yer tuttuğu için makalede sunulmamıştır. Ürünlerin önemli bir kısmında cumartesi günlerinde satışın diğer günlere oranla gözle görülür şekilde düşük olduğu gözlemlenmiş; aynı durum satışların normalize edildiği tüm ürünlere ait grafikte de gözlemlenmiştir (Şekil 11).



Şekil 11. Haftanın günleri bazında ortalama ürün satış miktarları (normalize edilmiş)

Verinin temizlenmesi

Eldeki satış verisinin eksik değerler barındırdığı, ancak temiz olduğu belirlenmiştir. Bunun üzerine, satış değerleri günlük olarak bir araya toplanmıştır. Satışın olmadığı günlere ilişkin kayıt bulunmadığından, bu günler için ürünler *Gerçek Ağırlık* = 0 olarak eklenmiştir. *Ürün Fiyatı* bilgisi yalnızca satış olduğu zamanlarda kaydedildiği ve ayrıca günlük değerlerinin kaydı bulunmadığı için, günlük gruplama sonrası oluşan eksik *Ürün Fiyatı* değerleri doldurulamamıştır. Bu durum, özellikle sık satılmayan ürünlerde yakın zamanlarda yaşanan fiyat değişikliklerinin ve etkilerinin takibini engellemiştir.

Eldeki kategori veri kümesinde eksik ve yanlış kayıtlar bulunduğu, ayrıca kategori ve alt kategori bilgilerinin doğrudan tutulmayıp dolaylı yoldan çıkarılması gerektiği belirlenmiş, gerekli çalışmalar yapılarak temiz ve eksiksiz bir veri kümesi elde edilmiştir.

Verinin Filtrelenmesi

Filtre: [*Toplama Türü* > 0] VE [*Gerçek Ağırlık* != 0] VE ~ [(*Gerçek Ağırlık* = 1) VE (*Tahmini Ağırlık* = (NaN)] (1)

Bu filtre (1), taze gıda olmayan ürünleri incelemeden hariç tutmak için uygulanmıştır. Filtreleme sonucunda 768 farklı kimlikli ürün bulunmuştur. Satışlar günler üzerinden birleştirilmiş, bir ürünün satışının olmadığı günlere ilişkin kayıt bulunmadığından, ürünün satışının olmadığı günlere ilişkin ilgili her ürün için *Gerçek Ağırlık* = 0 olarak eklenmiştir. Günlük kayıtların sayısı bu şekilde 2.170.368 (2826 gün * 768 ürün çeşidi) olmuş; bu da veriyi %86,53 oranında seyrek hale getirmiştir.

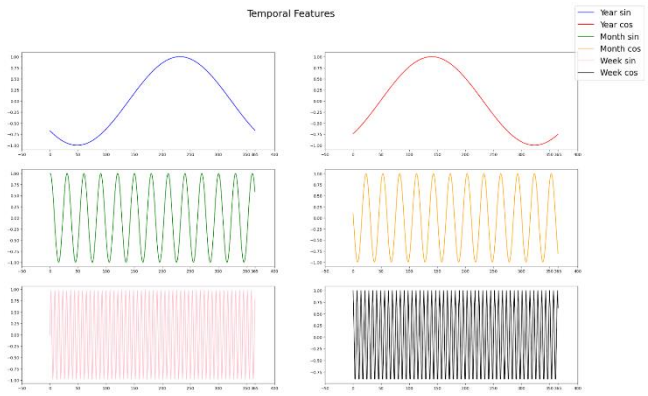
Verinin Ön İşlemesi

Yeni ürün tanıtımlarının işlenmesi: İncelenen zaman aralığında yeni ürün tanıtımları olduğu gözlemlendi. Bu ürünlerin dahil edilmesi çalışmada bilinmeyen sonuçlar doğurabileceği için, sonuçları etkilememek adına çıkarıldılar.
Kesintiye uğramış tarihsel satışların işlenmesi: Bazı ürünlerin uzun süre boyunca satışı olmadığı gözlemlendi. Bu davranışlarının nedeni hakkında bilgi bulunmadığından, yanlılıkları (*bias*) önlemek için, bu ürünler çalışmadan çıkarıldı.
Validasyon ve test kümelerini etkileyecek kesintiler: Validasyon ve test kümelerini etkileyecek satış kesintilerine sahip ürünler de çalışmadan çıkarıldı. Bu ürünler, incelenen son iki yıldan en az birinde satışı olmayan ürünler olarak tanımlanmışlardır.

Bu işlemler sonunda 159 farklı *Gıda Kimliği*'ne sahip ürün elde edildi. Bu verinin seyrekliği %53,26 olarak tespit edildi. Bu ürünlerin 7 farklı kategori ve 8 farklı alt kategoriye (- ile birbirlerinden ayrılmışlardır) ait olduğu görülmektedir:

Ekmek ve Unlu Mamüller: Ekmek
Et, Tavuk, Balık: Et & Et Ürünleri
Kahvaltılıklar: Peynir
Kuru Gıdalar: Makarna, Mantı & Un
Meyveler: Meyveler
Organik Ürünler: Organik Sebzeler - Organik Meyveler
Sebzeler: Sebzeler

Tarihler, zaman damgalarına çevrildi ve Şekil 12'deki gibi haftalık, aylık ve yıllık periyotlu, artık yılları da dikkate alan sinüs ve kosinüs sinyallerine dönüştürülerek bir zamansal kodlama oluşturuldu.

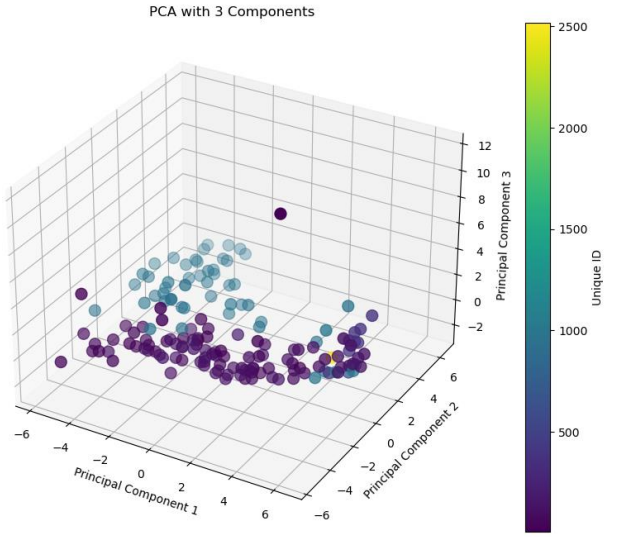


Şekil 12. Tarihlere ait haftalık, aylık ve yıllık sinyaller

R programlama dilindeki *tsfeatures* paketinin Python dilindeki uygulanması kullanılarak eldeki zaman serilerinden özellikler çıkarılmış, ardından Ana Bileşen Analizi (*Principal Component Analysis*) 3 ana bileşen ile uygulanarak sonuçlar görselleştirilmiştir. Ayrı ayrı hem tüm zaman serilerine hem de ön işlemeden sonra seçilen zaman serilerine uygulanan bu yöntemde kullanılan özellikler şunlardır:

unitroot_pp, unitroot_kpss, stability, trend, spike, linearity, curvature, e_acf1, e_acf10, x_pacf5, diff1x_pacf5, diff2x pacf5, nonlinearity, lumpiness, alpha, beta, flat spots, entropy, crossing points, arch lm, x acf1, x_acf10, diff1_acf1, diff1_acf10, diff2_acf1, diff2_acf10.

Şekil 13, seçilmiş zaman serilerinde yapılan çalışmayı görselleştirmektedir.

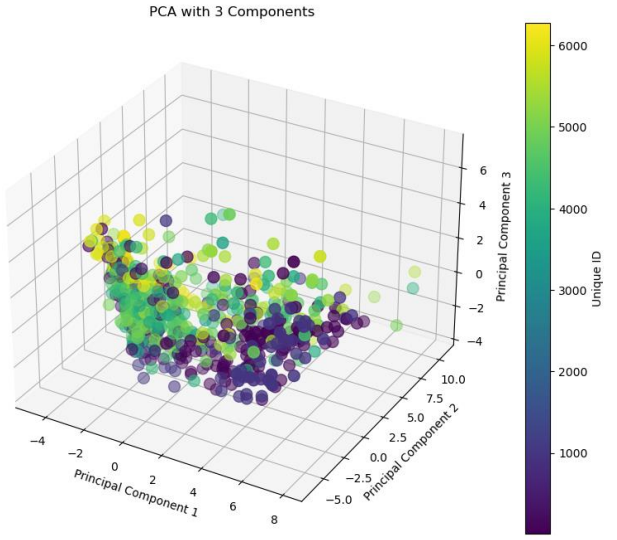


Şekil 13. Seçilmiş zaman serileri üzerinde 3 boyut ile PCA uygulanması sonucu ürünlerin uzayda görüntüsü

Ana bileşenler için açıkladıkları varyans oranları:

- Ana bileşen 1: 0.4558
- Ana bileşen 2: 0.1840
- Ana bileşen 3: 0.1080

ve toplam açıklanan varyans oranı 0.7478 olmuştur.



Şekil 14. Tüm zaman serileri üzerinde 3 boyut ile PCA uygulanması sonucu ürünlerin uzayda görüntüsü

Şekil 14, tüm zaman serilerinde yapılan çalışmaları görselleştirmiştir.
Ana bileşenler için açıkladıkları varyans oranları:

- Ana bileşen 1: 0.4255
- Ana bileşen 2: 0.1323
- Ana bileşen 3: 0.1043

ve toplam açıklanan varyans oranı 0.6621 olmuştur.
Yapılan bu analiz sonunda, zaman serilerinin incelenen özellikler açısından kolayca ayrışmadığı, ön işlemedeki zaman serisi seçimlerinin ise birbiriyle daha ilgili serilere ulaşmaya katkı sağladığı görülmektedir. Bunun üzerine TSNE ve UMAP boyut düşürme teknikleri de uygulanmış, sonuçları kümeleme işlemlerinde kullanılmıştır.

Kümeleme Çalışmaları

Çalışmanın bu safhasında, daha iyi sonuçlar elde edilmesine katkı sağlayabilecek zaman serileri kümeleri aranması üzerinde durulmuştur. Birbirine benzer zaman serilerinin ayırt edilip kümelenebilmesi durumunda, her küme için farklı bir model eğitilerek tüm zaman serileri için tek bir model veya her zaman serisi için ayrı bir model düzenlerinden daha başarılı sonuçlar elde edilebileceği varsayılmıştır.

Seçilmiş zaman serilerinin verileri bu noktada eğitim, doğrulama ve test kümelerine bölünmüş, kümeleme çalışmaları ve daha sonraki eğitim çalışmalarında yalnızca eğitim verisi kullanılmıştır. 2826 günden ilk 2226 gün eğitim için ayrılmış, sonraki 300 gün doğrulama ve son 300 gün ise test için kullanılmıştır.

Python programlama dilindeki *tslearn* paketinden, zaman serileri üzerinde kümeleme görevleri için kullanılan *TimeSeriesKMeans* kümeleme metodu ve hizalanmamış zaman serileri için başarılı sonuçlar veren Dinamik Zaman Bükümü (*Dynamic Time Warping*) algoritması gibi önemli yapılar, statsmodels paketinden, bir zaman serisini trend, mevsimsellik ve artık bileşenlerine ayırmaya yarayan mevsimsel ayrıştırma (*seasonal decomposition*) metodu, sktime paketinden eldeki zaman serisi verisini frekans alanına dönüştüren Ayrık Fourier Dönüşümü (*Discrete Fourier Transform*) araçlarından faydalanılarak yapılan kümeleme uygulamaları şu şekildedir:

Ham tek değişkenli zaman serisi verisi kullanılarak
- *TimeSeriesKMeans* kümeleme metodu uygulanması
- Hiyerarşik (*Hierarchical*) kümeleme metodu uygulanması
- Spektral (*Spectral*) kümeleme metodu uygulanması

Mevsimsel ayrıştırma ile
- Mevsimsellik bileşeni kullanılarak
  - *TimeSeriesKMeans* kümeleme metodu
  - Hiyerarşik (*Hierarchical*) kümeleme metodu
  - Spektral (*Spectral*) kümeleme metodu
- Trend bileşeni kullanılarak
  - *TimeSeriesKMeans* kümeleme metodu
  - Hiyerarşik (*Hierarchical*) kümeleme metodu
  - Spektral (*Spectral*) kümeleme metodu

Fourier Dönüşümü sonucunda elde edilen özellik kullanılarak
  - *TimeSeriesKMeans* kümeleme metodu
  - Hiyerarşik (*Hierarchical*) kümeleme metodu
  - Spektral (*Spectral*) kümeleme metodu

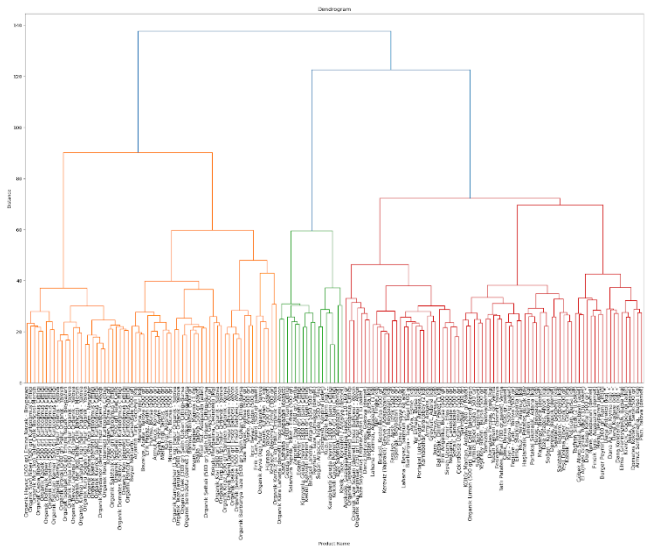
tsfeatures paketi kullanılarak çıkarılan özellikler kullanılarak
- *K-means* kümeleme metodu uygulanması
- Aglomeratif kümeleme metodu uygulanması
- Spektral (*Spectral*) kümeleme metodu uygulanması
- Gauss Karışım Modeli kümeleme metodu uygulaması
- DBSCAN kümeleme metodu kullanılması

Kümeleme başarıları silüet skoru (*silhouette score*) ile ölçülmüştür. Silüet skoru, bir kümeleme sonucunun

kalitesini değerlendirmek için kullanılan bir ölçüttür. Bir nesnenin kendi kümesiyle diğer kümelere kıyasla ne kadar benzer olduğunu ölçer. Skor, -1 ile 1 arasında değişir: 1, nesnenin çok iyi kümelendiğini gösterir. 0, nesnenin iki komşu küme arasındaki karar sınırında veya ona çok yakın olduğunu gösterir. -1, nesnenin kötü kümelendiğini ve yanlış kümeye atanmış olabileceğini gösterir.

Tüm nesneler için ortalama silüet skoru hesaplanır. Daha yüksek bir ortalama skor genellikle daha iyi bir kümeleme kalitesi anlamına gelir. 0.5'in üzerindeki skorlar genellikle iyi olarak kabul edilirken, 0.7'nin üzerindeki skorlar çok iyi bir kümelemeyi gösterir.

Ham veri üzerinden yapılan tüm kümelemelerde, benzerlik ölçütü olarak Dinamik Zaman Bükümü (*Dynamic Time Warping*) algoritması kullanılmıştır. Satış dönemlerinde meydana gelebilecek potansiyel bir kaymanın sonuçlara etki etmemesi için noktalar arası Öklid mesafesi (*Euclidean distance*) gibi ölçütler yerine tercih edilmiştir. Mevsimsel ayrıştırma bir zaman serisini, verinin davranışını daha iyi anlamak için temel bileşenlerine ayırmak amacıyla kullanılan bir tekniktir. Bir zaman serisi üç ana bileşene ayrılır:



Şekil 15. Hiyerarşik kümeleme sonuçları

Trend: Bu bileşen, verideki uzun vadeli ilerlemeyi temsil eder. Verinin zamanla yukarı, aşağı veya yatay hareket edip etmediğini gösteren genel yönelimdir. Trend bileşeni, kısa vadeli dalgalanmaları hariç tutarak verinin altında yatan deseni belirlemeye yardımcı olur.

Mevsimsellik: Bu bileşen, verideki tekrarlayan ve periyodik karakterli desenleri yakalar. Bu desenler, mevsimsel faktörler nedeniyle belirli aralıklarla düzenli olarak ortaya çıkar. Örneğin, satışlar yaz tatilinde insanların evlerinde bulunmaması nedeniyle azalabilir veya belirli ürünlere olan talep belirli mevsimlerde yükselebilir.

Artık veya Düzensiz Bileşen: Bu bileşen, trend veya mevsimsellik tarafından açıklanamayan verideki gürültü veya rastgelelikleri içerir. Bu, öngörülebilir bir deseni takip etmeyen rastgele dalgalanmalar veya düzensiz değişikliklerdir.

Çalışma sonucu alınan kümeleme sonuçları aşağıda belirtilmiştir:

- Ham tek değişkenli zaman serisi verisi kullanılarak 0,5 üzerinde silüet skoruna sahip bir kümeleme bulunamadı.
- Mevsimsel ayrıştırma ile mevsimsellik bileşeni kullanılarak 0,5 üzerinde silüet skoruna sahip bir kümeleme bulunamadı. En yüksek ikinci silüet skorları bu bileşen ile elde edildi.
- Mevsimsel ayrıştırma ile trend bileşeni kullanılarak 0,5 üzerinde silüet skoruna sahip bir kümeleme bulunamadı.
- Fourier Dönüşümü sonucunda elde edilen özellik kullanılarak 0,5 üzerinde silüet skoruna sahip bir kümeleme bulunamadı.
- *tsfeatures* üzerinden çıkarılan özellikler kullanılarak 0.5 üzerinde silüet skoruna sahip kümelemeler bulundu.

Ham zaman serisi verisi üzerinden elde edilen Hiyerarşik Kümeleme sonuçları Şekil 15'te gösterilmiştir.

Spektral kümeleme sonuçlarının tamamının sonuçları 0'ın altında silüet skoru almış olup kötü kümelenmeye işaret etmektedir. Bu durum verinin tek değişkenliğinden veya karmaşık bir küme yapısının olmamasından kaynaklanabilir.

Mevsimsellik bileşeninin ham veriyi kümelemeye en elverişli bileşen olduğu tespit edilmiş, Dinamik Zaman Bükümü algoritmasının geliştirilmiş bir versiyonu olan *SoftDTW* ile kümeleme işlemi en yüksek silüet skorunu alan *TimeSeriesKMeans* metodu ile tekrar çalıştırıldı. 0.5 üzerinde silüet skoruna sahip kümelemeler bulundu. *SoftDTW* metodunun hesaplama karmaşıklığının yüksek olduğu, özellikle de kullanılan veri kümesi gibi uzun süreli zaman serilerinde çok uzun sürede sonuç verdiği not edilmelidir.

Dinamik Zaman Bükümü (*Dynamic Time Wrapping-DTW*) ve raporda açıklandığı üzere ilgili alanlarda geliştirilmiş versiyonu olan *SoftDTW* algoritmalarından alınan kümeleme sonuçları aşağıda verilmiştir.

Ham veri üzerinde *TimeSeriesKMeans* kümelemesinin, her Gıda Kimliği için tek seri kullanılarak, tüm süre üzerinden normalize edilmiş satış miktarları üzerinden benzerlik sonuçları Tablo 1'de, hiyerarşik ve spektral kümeleme sonuçları ise Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Ham veri üzerinde TimeSeriesKMeans kümelemesi sonuçları

DTW		**SoftDTW**	
Küme Sayısı	Silüet Skoru	Küme Sayısı	Silüet Skoru
2	0.166767	2	0.236162
3	0.129943	3	0.173653
4	0.080402	4	0.118087
5	0.075215	5	0.122781

6	0.082058	6	0.153005

Tablo 2. Ham veri üzerinde hiyerarşik ve spektral kümeleme sonuçları

Hiyerarşik kümeleme (DTW)		**Spektral kümeleme (DTW)**	
Küme Sayısı	Silüet Skoru	Küme Sayısı	Silüet Skoru
2	0.098361	2	-0.028011
3	0.120245	3	-0.036633
4	0.079123	4	-0.066113
5	0.076575	5	-0.066084
6	0.086543	6	-0.058011

Tüm süre üzerinden normalize edilmiş satış miktarlarına sahip serilerden mevsimsel ayrıştırma ile elde edilen mevsimsellik ve trend bilgileri üzerinden kümeleme yapılmış, her ürün için tek seri kullanılmıştır. Mevsimsellik için Tablo 3'te *TimeSeriesKMeans* kümeleme algoritması ile uzaklık hesaplamaları için DTW ve *SoftDTW* kullanılması sonucu alınan silüet skorları, Tablo 4'te hiyerarşik ve spektral kümeleme algoritmaları ile *DTW* kullanılması sonucu alınan silüet skorları verilmiştir. Trend için Tablo 5'te *TimeSeriesKMeans* kümeleme algoritması ile *DTW* kullanılması sonucu alınan silüet skorları, Tablo 6'da hiyerarşik ve spektral kümeleme algoritmaları ile *DTW* kullanılması sonucu alınan silüet skorları verilmiştir. Ayrıca her ürün için tek seri kullanılarak Fourier dönüşümü de uygulanmış, çıktılar üzerinde *DTW* kullanılmış, çıktılar Tablo 7 ve Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 3. Mevsimsel bileşen üzerinde *TimeSeriesKMeans* kümelemesi sonuçları

DTW		**SoftDTW**	
Küme Sayısı	Silüet Skoru	Küme Sayısı	Silüet Skoru
2	0.398851	2	0.562553
3	**0.409759**	3	**0.574747**
4	0.342410	4	0.513856
5	0.331625	5	0.512557
6	0.320067	6	0.508367

Tablo 4. Mevsimsel bileşen üzerinde hiyerarşik ve spektral kümeleme sonuçları

Hiyerarşik kümeleme (DTW)		**Spektral kümeleme (DTW)**	
Küme Sayısı	Silüet Skoru	Küme Sayısı	Silüet Skoru
2	0.394005	2	-0.015400
3	0.325798	3	-0.035023
4	0.324963	4	-0.063858
5	0.316500	5	-0.076701
6	0.329073	6	-0.101301

Tablo 5. Trend bileşeni üzerinde *TimeSeriesKMeans* kümelemesi sonuçları

DTW	
Küme Sayısı	Silüet Skoru
2	0.202558
3	0.173458
4	0.172085
5	0.177106
6	0.165388

Tablo 6. Trend bileşeni üzerinde hiyerarşik ve spektral kümeleme sonuçları

Hiyerarşik kümeleme (DTW)		**Spektral kümeleme (DTW)**	
Küme Sayısı	Silüet Skoru	Küme Sayısı	Silüet Skoru
2	0.208320	2	-0.018545
3	0.168085	3	-0.038094
4	0.180301	4	-0.055345
5	0.168528	5	-0.068271
6	0.167159	6	-0.084200

Tablo 7. Fourier dönüşümü çıktısı üzerinde *TimeSeriesKMeans* kümelemesi sonuçları

DTW	
Küme Sayısı	Silüet Skoru
2	0.228800
3	0.228623
4	0.145337
5	0.175208

6	0.162159

Tablo 8. Fourier dönüşümü çıktısı üzerinde hiyerarşik ve spektral kümeleme sonuçları

Hiyerarşik kümeleme (DTW)		**Spektral kümeleme (DTW)**	
Küme Sayısı	Silüet Skoru	Küme Sayısı	Silüet Skoru
2	0.173000	2	-0.008773
3	0.207786	3	-0.025966
4	0.151363	4	-0.052478
5	0.152575	5	-0.130124
6	0.125460	6	-0.136958

İncelenen tüm *tsfeatures* özellikleri üzerinden veya PCA ve TSNE boyut düşürme yöntemleri ile 0,5 üzerinde silüet skoruna sahip kümeleme bulunamasa da, UMAP boyut düşürme metodu ile 0.5 üzerinde silüet skoruna sahip kümelemeler bulundu. Bu aday kümelemeler üzerinden Davies-Bouldin Index ve Calinski-Harabasz Index değerleri incelenerek en iyi adaylar seçildi. Sonuçlar Tablo 9'da gösterilmiştir.

LSTM modeli, bu çalışmadaki veri üzerinden hiperparametre ayarlamasından geçirilmiş, iki katmanlı, katman çıktısından sonra Dropout uygulanan, her katmandaki hücre sayısı 448 olan bir ağın en yüksek başarıyı gösterdiği belirlenmiştir. Aynı şekilde öğrenme hızı parametresi de seçilmiştir. Çalışmalarda tek *Gıda Kimliği* üzerinden eğitilmeyen modellerde, LSTM durumlu (*stateful*) olarak kullanılmış, parti boyutu buna göre ayarlanmış, partiler uygun şekilde verilmiş ve karıştırma engellenmiştir. Tek *Gıda Kimliği* üzerinden eğitilen modellerde parti boyutu 32 olarak seçilmiştir.

Tablo 9. *tsfeatures* özelliklerinden UMAP boyut düşürme yöntemi ile alınan en yüksek silüet skorlu kümeleme sonuçları

Kümeleme Yöntemi	Küme Sayısı	Silüet Skoru
K-means	3[1]	0.699991
K-means	4	0.663826
Aglomeratif	3	0.699991
Aglomeratif	4	0.647261
Spektral	3	0.699991
Spektral	4	0.661110
GMM	3	0.699991
GMM	4	0.651314
DBSCAN	5[2]	0.472211

Bu model ile önce tüm zaman serisi verisinin ham haliyle tek model ile eğitildiği ve her *Gıda Kimliği* zaman serisi verisi için ayrı bir modelin eğitildiği iki farklı çalışma yapılmıştır. Tek model ile alınan sonuçların daha başarılı olduğu görülmüştür. Bu durum, literatürdeki bulgularla da örtüşmektedir. Bu çalışmadan referansla birbirine benzer zaman serilerinin bir arada kümelenmesiyle daha başarılı sonuçlar elde edilip edilemeyeceği incelenmek istenmiştir. Yapılan kümeleme çalışmalarında kümelemeye uygun sonuçlar seçilerek her küme için ayrı bir model eğitilmiştir. Alınan sonuçlarda istatistiksel olarak önemli miktarda iyileşme sağlayan bir kümeleme bulunamamıştır. Ancak veride belirtilen kategori ve alt kategorilere göre yapılan bir kümeleme ile karşılaştırıldığında daha iyi sonuç veren kümelemelere rastlanmıştır.

XGBoost modeli, bu çalışmada erişilen kategori bilgileri de dahil edilerek kullanılmıştır. XGBoost'un kategorik verileri işleme yeteneğinin olması ve bu yeteneğin kolayca etkinleştirilebilmesi, kategori çalışmasının bu modelle yapılmasını istenir kılmıştır. Üç ayrı çalışma yapılmış, ilkinde *Gıda Kimliği* bilgileri, ikincisinde hem *Gıda Kimliği* hem de Kategori ve Alt Kategori bilgileri, XGBoost modeline ham verinin yanında kategorik özellik olarak verilmiş, üçüncü ise yalnızca ham veri olarak eğitilmiştir. Yalnızca *Gıda Kimliği'*nin eklenmesi sonucunda istatistik olarak önemli boyutta bir iyileşme gözlenmiş; ancak Kategori ve Alt Kategori bilgilerinin etkilenmesi performansı daha fazla etkilememiştir. Bu durum eldeki Kategori ve Alt Kategori bilgilerinin oldukları gibi kullanılmayıp öğrenmeye fayda sağlaması için ayrıca işlenme gerektirebileceğini düşündürmektedir.

Eğitim Sonuçları

Tüm eğitimler 5 numune ile gerçekleştirilmiş, ortalama ve standart sapma değerleriyle birlikte (XGBoost modelinde stokastik parametre seçimi bulunmasına rağmen verinin aynı sırada verilmesi aynı sonuçların alınmasını sağlamıştır), MSE ve MAE değerleri Tablo 10'da sunulmuştur.

Tablo 10. Ham veri üzerinde kümelemesiz (tek küme) düzende LSTM ve XGBoost model sonuçları

	LSTM	XGBoost	XGBoost (+FoodId)[3]
MSE	13.437 ± 0.154	14.085	13.629
MAE	1.786 ± 0.008	1.830	1.792

[1] 3 kümeli yaklaşımların tamamında aynı kümelemenin yapıldığı görülmüştür.

[2] DBSCAN tüm veriyi kümeleme zorunluluğu olmadığı için 5 küme bulmuş olup bu kümelere yerleştirmediği birçok aykırı veri de bulunmaktadır.

[3] LSTM modeli *stateful* olarak kullanıldığı için örtük olarak hangi verinin hangi seriden geldiği bilgisine sahiptir. XGBoost modelinin de bu avantajdan faydalanabilmesi için *FoodId* bilgisi kategorik olarak eklenmiş, performansı LSTM seviyesine getirdiği görülmüş, raporlanan sonraki modellerde bu şekilde kullanılmıştır.

159 küme düzeni üzerinde LSTM ve XGBoost modellerinden alınan sonuçlar Tablo 11'de sunulmuştur.

Tablo 11. Ham veri üzerinde her Gıda Kimliği üzerinde ayrı kümeleme düzeninde LSTM ve XGBoost model sonuçları

	LSTM	XGBoost
MSE	15.262 ± 0.257	17.032
MAE	1.933 ± 0.011	2.040

En yüksek silüet skoru alan mevsimsel bileşen üzerinde yapılan kümelemelerle uygulanan eğitimin sonuçları Tablo 12'de verilmiştir.

Tablo 12. Mevsimsel bileşen üzerinde *TimeSeriesKMeans* kümeleme düzeninde LSTM ve XGBoost model sonuçları

	LSTM (2 küme)	LSTM (3 küme)	XGBoost (2 küme)	XGBoost (3 küme)
MSE	13.663 ± 0.366	13.195 ± 0.179	13.446	13.378
MAE	1.821 ± 0.009	1.807 ± 0.022	1.798	1.783

En yüksek silüet skoru alan *tsfeatures* özellikleri üzerinde UMAP boyut düşürme metodu uygulandıktan sonra yapılan kümelemelerle uygulanan eğitimin sonuçları Tablo 13'te verilmiştir. Verideki kategori ve alt kategori bilgisine göre yapılan kümeleme ve kümeleme uygulanmama durumu ile aynı seviyede sonuçlar alınmıştır.

Tablo 13. Uygulanan kümeleme yöntemlerinin en iyileri kullanılarak alınan tahmin sonuçları

Model	**Boyut Düşürme Yöntemi**	**Kümeleme Yöntemi (Küme Sayısı)**	**MSE**	**MAE**
LSTM	*tsfeatures* özellikleri üzerinden UMAP	DBSCAN (5)	14.344 ± 1.4955	1.930 ± 0.132
XGBoost			13.538	1.809
LSTM		K-means (3)[4]	13.335 ± 0.392	1.793 ± 0.023
XGBoost			13.407	1.786
LSTM		K-means (4)	12.995 ± 0.131	1.796 ± 0.009
XGBoost			13.411	1.789
LSTM		Aglomeratif kümeleme (4)	15.170 ± 0.821	1.933 ± 0.054
XGBoost			13.453	1.791
LSTM		Spektral kümeleme (4)	13.004 ± 0.162	1.805 ± 0.024
XGBoost			13.435	1.789
LSTM		GMM kümeleme (4)	13.039 ± 0.116	1.802 ± 0.007
XGBoost			13.401	1.788
LSTM	Yok	Kategori ve alt kategori bilgisine göre (8)	14.755 ± 2.079	1.886 ± 0.138
XGBoost			13.393	1.795
LSTM		Kategori ve alt kategori bilgisinin girdiye eklenmesiyle (kümeleme yok)	13.422 ± 0.547	1.785 ± 0.016
XGBoost			13.601	1.79

Kapsamlı kümeleme çalışmalarından fayda sağlanamaması sonrasında, tüm ürünlerin verisinin tek bir modelde kullanıldığı yoldan devam edilmesi tercih edilmiş, ürünlerdeki indirim bilgisi girdilere eklenmiştir. Tahmin edilecek günün satış değerinin indirimden etkileneceği için o günün zamansal özelliklerinin de indirim bilgisiyle beraber modele girdi olarak verilmesi uygun bulunmuştur. 7 günlük geçmiş veri girdisiyle yapılan sonraki gün tahminleri; tahmin yapılacak gün için indirim bilgisinin eklenmesinin gerekliliği üzerine indirim bilgisinin ve tahmini yapılacak günün zamansal özelliklerinin de eklenmesi, girdiler arası boyut uyumu için de tahmin gününde gerçek talep miktarının yerine farklı bir değer kullanılması şeklinde yapılmıştır. Modeller yeni girdiler ile baştan eğitilmiş ve alınan sonuçlar önceki sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu eğitimin sonuçları Tablo 14'te verilmiştir.

Tablo 14. Kümeleme kullanılmayan yeni girdi modeli ile karşılaştırma ve yeni girdi modeli + indirim sonuçları

Model	**Girdi Modeli**	**MSE**	**MAE**
LSTM	7 + 1 (ortalama değer)	14.180 ± 0.724	1.808 ± 0.027
XGBoost		13.751	1.8
LSTM	7 + 1 (son değer)	13.180 ± 0.074	1.761 ± 0.020
XGBoost		13.767	1.809
LSTM	7 + 1 (son değer) + indirim bilgisi	**12.209 ± 0.270**	**1.692 ± 0.030**
XGBoost		**12.541**	**1.738**

Yeni girdi ile eğitilen modellerin kendi başlarına istatistiksel olarak önemli bir avantajları olmadığı görülmüş, indirim bilgisinin eklenmesinin ise hatada istatistiksel olarak önemli bir azalma sağladığı tespit edilmiştir.

[4] Aynı kümeleme çıktısına aglomeratif kümeleme (3), spektral kümeleme (3) ve GMM kümelemesi (3) yöntemleri de sahiptir.

Sonuç

Bu çalışma, e-ticaret sektöründe faaliyet gösteren gıda perakendecileri için daha doğru talep tahminleri yapmayı amaçlayan bir sistem geliştirmiştir. Günümüzde işletmeler için stok yönetimi ve tedarik zinciri optimizasyonu gibi süreçler kritik öneme sahiptir. Özellikle gıda sektöründe, hızla bozulabilen ürünlerin talebinin doğru tahmin edilmesi, işletmelerin bu süreçlerde maliyetlerini düşürmesine ve müşteri memnuniyeti ve sürdürülebilirliği artırmasına yardımcı olmaktadır. Çalışmamızda, 2016-2023 yılları arasındaki yedi yıllık satış verileri analiz edilerek taleplerin nasıl değiştiği ve yakın gelecekte nasıl öngörülebileceği incelenmiştir. Çalışmanın katkıları şu şekilde özetlenebilir: Makine öğrenmesi modelleri (LSTM ve XGBoost) ile satış tahmini yapılması, veriyi daha anlamlı hale getirmek için kümeleme yöntemlerinin uygulanması ve pandemi gibi olağanüstü durumların talep üzerindeki etkisinin analiz edilmesi.

Yapılan testler sonucunda, LSTM modeli en başarılı tahmini yapmış olduğu, XGBoost modelinin de aynı seviyede güçlü olduğu ve hızı sebebiyle etkili bir alternatif olduğu sonucu çıkarılmıştır. Kümeleme yöntemleri incelendiğinde, mevsimselliğe dayalı gruplandırmaların daha anlamlı tahminler üretebildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, ürünlerdeki fiyat indirimleri gibi dışsal faktörlerin tahmin modellerine dahil edilmesinin, tahmin doğruluğunu artırabileceği belirlenmiştir.

Bu çalışmanın ortaya koyduğu metodoloji, yalnızca gıda sektörüyle sınırlı kalmadan, e-ticaretin farklı alanlarında da uygulanabilir. Benzer bir yaklaşımla, elektronik, moda ve kozmetik gibi sezonsallık barındıran sektörlerde de talep tahminlerini iyileştirmek mümkündür. Zira, pandemi gibi sıradışı bir dönemde bazı sektörlerdeki müşteri hareketlerinde artış gözlenirken (örneğin online gıda), başka sektörlerdeki hareketlerde azalma (örneğin kozmetik) görülmüştür. Sonuç olarak, bu çalışma, işletmelerin daha iyi kararlar almasını sağlamak ve talep tahmin süreçlerini optimize etmek için veri odaklı genel bir çözüm sunmaktadır. Gelecekte, farklı sektörlerde benzer analizlerin yapılması ve daha fazla dış faktörün (özel günler, hava durumu, sosyal eğilimler vb.) modellenmesi, bu tür tahmin sistemlerini daha da geliştirilebilir.

Teşekkür

Bu araştırma, Tübitak 1501 programı destekli 3230999 numaralı ‘FoReML: Gıda Perakende Sektöründe Talep Tahmin ve Öneri Sistemi’ projesi ve Galatasaray Üniversitesi FBA-2024-1258 numaralı BAP projesi tarafından desteklenmiştir.

Yazar Katkıları

- Çalışma konsepti ve tasarım: Bozdoğan, Alptekin

-Veri toplama: Bozdoğan

-Verilerin analizi ve yorumlanması: Bozdoğan

-Taslağın oluşturulması: Bozdoğan, Alptekin

-Revizyon: Alptekin

Kaynaklar

[1] K. Lutoslawski, M. Hernes, J. Radomska, M. Hajdas, E. Walaszczyk, and A. Kozina, “Food demand prediction using the nonlinear autoregressive exogenous neural network,” IEEE Access, vol. 9, pp. 146 123–146 136, 2021.

[2] Analytics Vidhya. (2020). Food Demand Forecasting [Data set]. Kaggle.

https://doi.org/10.34740/KAGGLE/DSV/1138962

[3] M. Aci and D. Yergök, “Demand forecasting for food production using machine learning algorithms: A case study of university refectory,” Tehnič kivjesnik, vol. 30, no. 6, pp. 1683–1691, 2023.

[4] F. T. Liu, K. M. Ting, and Z.-H. Zhou, "Isolation forest," in *2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining*, 2008, pp. 413-422.

[5] D. Müllner, "Modern hierarchical, agglomerative clustering algorithms," *arXiv preprint arXiv:1109.2378*, 2011.

[6] A. Ng, M. Jordan, and Y. Weiss, "On spectral clustering: Analysis and an algorithm," in *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 14, 2001.

Tablo 13. Uygulanan kümeleme yöntemlerinin en iyileri kullanılarak alınan tahmin sonuçları

Dicle University
Journal of Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/dumf
duje.dicle.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

Boya seyreltme ve Winter-Kennedy metotları kullanılarak yapılan hidrolik türbin performans testlerinin karşılaştırmalı analizi-saha çalışması

Comparative analysis of hydraulic turbine performance tests using dye dilution and winter-kennedy methods- a case study

Gökhan Özbek[1*], Sabir Rüstemli[2]

[1] EÜAŞ Alpaslan-1 Hidroelektrik Santrali, Elektrik Bakım Başmühendisliği, gokhanozbek1986@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1160-1955

[2] Bitlis Eren Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, srustemli@beu.edu.tr
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4957-1782

MAKALE BİLGİLERİ

MakaleGeçmişi:

Geliş 27 Aralık 2024
Revizyon 27 Şubat 2025
Kabul 27 Mart 2025
Online 30 Haziran 2025

AnahtarKelimeler:

Winter-Kennedy Metodu,
Boya Seyreltme Metodu,
Performans Testi,
Debi Ölçümü,
Enerji Verimliliği

ÖZ

Performans testi, hidroelektrik santral verimliliğinin kabul edilemez seviyelere düşmediğinden emin olmak için mutlak yapılması gereken bir faaliyettir. Fabrika çıkışında beyan edilen garantileri kontrol etmek, mevcut durumun analizi ile olası revizyonları ve yatırım maliyetlerini belirlemek, türbin-generatör ünitelerinde verimli çalışma koşullarını aramak ve generatör güç çıktısını artırmak bu testlerin amaçları arasındadır. Bu çalışmada, boya seyreltme ve Winter-Kennedy debi ölçüm metotları kullanılarak bir türbin-generatör ünitesinde performans testleri yapılmıştır. Testler için ünitede Verim İzleme Sistemi kurulmuştur. Testlerden sonra sistem sürekli çalışma modunda bırakılarak, verim izlemenin anlık olarak devam etmesi mümkün kılınmıştır. Testler aynı çalışma ve işletme koşullarında, aynı zaman aralığında yapılmıştır. Böylece test sonuçlarının karşılaştırmalı analizine, testlerin doğruluklarının ölçülmesine imkân sağlanmıştır. Performans testlerinde, türbinde %3.5 oranında bir verim kaybının olduğu görülmüştür. Generatörde ise bu kaybın %0.1 oranında gerçekleştiği tespit edilmiştir. Testlerde, brüt düşüye göre düzeltilmiş generatör gücü 47.7 MW olarak hesaplanmıştır. Buna göre, tasarım değeri 40 MW olan generatörün kapasitesinin artırılabileceği değerlendirilmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 27 December 2024
Received in revised form 27 February 2025
Accepted 27 March 2025
Available online 30 June 2025

Keywords:

Winter-Kennedy Metod,
Dye dilution Method,
Performance Test,
Flow Measurement,
Energy Efficiency

ABSTRACT

Performance testing is an activity that must be done to ensure that hydroelectric power plant efficiency does not fall to unacceptable levels. The objectives of these tests include checking the warranties declared at the factory, determining possible revisions and investment costs by analyzing the current situation, searching for efficient operating conditions in turbine-generator units and increasing generator power output. In this study, performance tests were conducted on a turbine-generator unit using dye dilution and Winter-Kennedy flow measurement methods. An Efficiency Monitoring System was installed in the unit for the tests. After the tests, the system was left in continuous operation mode, allowing instantaneous efficiency monitoring. The tests were conducted under the same operating and operating conditions and at the same time interval. Thus, comparative analysis of the test results and measurement of the accuracy of the tests were made possible. In the performance tests, it was observed that there was a 3.5% efficiency loss in the turbine. It was determined that this loss occurred at a rate of 0.1% in the generator. In the tests, the generator power corrected according to gross head was calculated as 47.7 MW. Accordingly, it was evaluated that the capacity of the generator with a design value of 40 MW could be increased.

DOI: 10.24012/dumf.1608410

* SorumluYazar

Giriş

Elektrik enerjisi hayatın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Nüfus artışı, gelişen sanayi ve tüketim alışkanlıkları enerjiye olan ihtiyacı her geçen gün artırmaktadır [1]. Elektrik enerjisinin üretim potansiyeli ve üretimdeki kaynak çeşitliliği, kişi başı enerji üretimi/tüketimi ülkelerin gelişmişlik düzeyini gösteren bir faktör olarak kabul edilmektedir [2, 3]. Özellikle az gelişmiş ve gelişmekte olan devletler yaşam kalitelerini iyileştirmek ve rekabetçi dünyada hayatta kalmak için ulusal ekonomilerini güçlendirmeleri gerektiği yönündeki beklentileri karşılamak amacıyla, üretkenliği artırma konusunda baskı altındadır [4].

İknicil bir enerji çeşidi olarak elektrik, dünyada en çok kullanılan enerji formlarındandır. Elektrik enerjisi kömür, petrol, doğalgaz, nükleer güç ya da yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak elde edilmektedir. Hidrolik güç yenilenebilir enerji kaynakları arasındadır [5, 6]. Hidrolik gücün kaynağının su olması ve evrende su döngüsünün kesintisiz gerçekleşmesi, bu gücü tükenmez yapmakta [7, 8]; suyun karbon molekülü içermemesi, çevreyi ve havayı kirletecek kimyasal atıklara sebebiyet vermemesi ise bu gücü temiz enerji kılmaktadır [9]. Hidrolik güç kullanılarak elektrik enerjisinin elde edildiği tesisler olan hidroelektrik santralleri ise, termik santraller gibi fosil yakıt kaynaklı santrallerin yaklaşık iki katı oranında, %85-90 verimlilikle çalışan santrallerdir. Dünyadaki toplam tüketilen katı yakıtların %10'undan fazlasının tüketildiği termik santrallerin alternatifi olabilecek enerji tesislerin başında bu santraller gelmektedir. Bu santrallerin mevcut durumda bile termik santrallerde atık olarak üretilen cürufun en az 586 milyon ton daha az olmasını sağladığı tespit edilmiştir [10-11].

2015 yılı verilerine göre dünyada toplamda 62500 adet HES bulunmaktadır [12, 13]. Dünya genelinde kurulu HES gücü 2023 yılında 1412 GW olmuştur [14]. 2023 yılında dünya genelinde 29479.05 TWh elektrik enerjisi üretilmişken, bunun %14.28'i yani 4211.01 TWh'lık kısmı hidroelektrik santrallerinden karşılanmıştır [15]. Ülkemizde 2024 yılı Ağustos ayı itibarıyla elektrik enerjisi kurulu gücü 113932 MW olmuştur. Bunun %28.3'lük kısmını hidrolik enerji oluşturmaktadır. Bu dönemde elektrik enerjisi üretim santrali sayısı, lisanssız santraller ile birlikte 31241'e yükselmiştir. Güneş santralleri 29163 adet ile en yüksek orana sahip iken, hidroelektrik santraller 764 adetle ikinci sıradadır. Türkiye elektrik enerjisi tüketimi 2023 yılında bir önceki yıla göre %1.2 oranında artarak 335.2 TWh, elektrik üretimi ise bir önceki yıla göre %0.8 artarak 331.1 TWh olarak gerçekleşmiştir [16]. 2023 yılında üretilen elektrik enerjisinin %19.43'lik kısmı ise hidrolik enerjiden karşılanmıştır [17]. Türkiye Ulusal Enerji Planına göre elektrik tüketiminin 2025 yılında 380.2 TWh, 2030 yılında 455.3 TWh, 2035 yılında ise 510.5 TWh seviyesine ulaşması beklenmektedir [18].

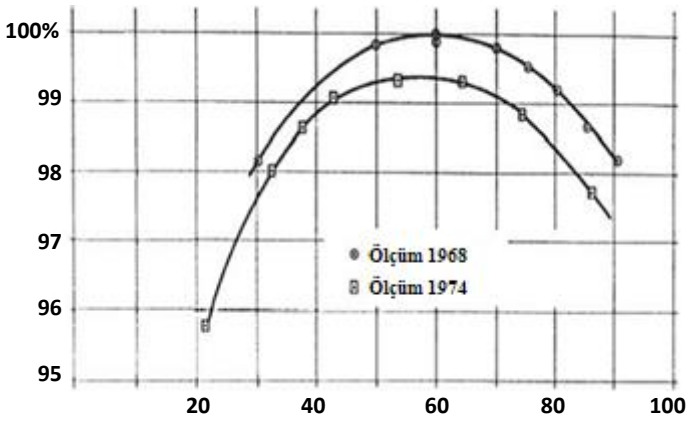
Enerji arzındaki önemi sürekli artan HES'ler, uzun ömürlü olacak şekilde inşa edilirler. Bu durum santrallerin verimliliklerini yükseltme, yenileme ve modernizasyon yoluyla kapasite ve üretimi artırma, işletme ömürlerini uzatma fırsatları sunmaktadır. 2022 yılı analizlerine göre, dünya genelindeki hidroelektrik santrallerinin üretkenlik artırıcı modernizasyon çalışmalar ile mevcuttaki toplam kurulu gücün yaklaşık 9 GW artırılabileceği öngörülmüştür. Dünya genelinde 30 yaşından büyük HES'lerin kurulu gücünün 600 GW'a, 40 yaşından büyük HES'lerin kurulu gücünün ise 400 GW'a yaklaşması modernizasyon çalışmalarının önemini ortaya koymaktadır [19].

Enerjide üretkenliğin temel ilkesi, minimum girdi ile maksimum çıktının elde edilmesidir. Üretkenlik yaklaşımları genellikle üretkenliği artırmak için her türlü atığı ve kaybı azaltmaya odaklanır. Hidroelektrik santrallerinin '*yakıtı*' olarak kullanılan suyun elektrik enerjisine dönüştürülme oranı, HES verimliliğin temelini oluşturmaktadır. Bu bağlamda, türbin çarkını döndürmeden veya türbin çarkını döndürmesine rağmen istenilen gücü üretemeden santralden çıkan su, yakıt ya da daha genel bir ifade ile hammadde israfı olarak görülmektedir [4].

Türbin, santralin maliyetini ve genel performansını doğrudan etkilediği için hidroelektrik santrallerindeki en kritik bileşendir. Yüzyılı aşkın süredir kullanılan hidrolik türbinlerin gelişen teknolojiyle birlikte daha az maliyetle daha çok elektrik üretebilme yeteneğine sahip olması istenmektedir. Bunun karşılanabilmesinde ise hidrolik türbinlerin tasarımı önemli bir rol oynamaktadır. Herhangi bir hidroelektrik projesinin maliyet etkin tasarımı için, gerçek kullanıma girmeden önce hidro türbinlerinin hidrolik davranışını ve verimliliğini tahmin etmek çok önemlidir [20]. Hidrolik türbinler farklı çalışma koşullarına sahip olduklarından, her türbin işletme gereksinimlerini karşılamak üzere özel, kendine özgü tasarlanmaktadır [21]. Tasarlanmış bir türbinin performansı ise, bir dereceye kadar, hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları ile doğrulanabilmektedir. Ancak performans ve güvenilirliği sağlamak için IEC standartlarına göre deneysel testlerin de yapılması gereklidir. Model testler için, gerçek santral koşullarını simüle etmek üzere özel olarak tasarlanmış test tesislerine ihtiyaç vardır [22]. Model testlerin sunduğu, fabrika çıkış garanti değerlerin ise türbinin santraldeki montajından sonra yapılacak olan saha performans testleri ile kontrol edilmesi ve doğrulanması elzemdir.

Çalışma koşullarına uygun olarak tasarlanmadan inşa edilen, kapasitesinden daha az elektrik üreten birçok elektrik santrali mevcuttur. Bu tip hidroelektrik santrallerin mevcut türbinlerini uygun maliyetli rehabilitasyon projeleri ile optimize ederek enerji üremini %6-8 oranında artırmak mümkündür [23].

Normalde hidrolik türbinler, performansında bozulma olmadan 50-100 yıllık bir ömre sahip olacak şekilde tasarlanmaktadırlar. Çalışma koşullarına göre tasarımın yapılmaması haricinde, işletme şartlarında meydana gelen çeşitli olayların etkisiyle türbinlerin ömrü azalmakta ve performanslarında keskin düşüşler yaşanmaktadır. Yararlı iş yapmadan suyun sızması, akış alanı içindeki ikincil akış veya yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanan sürtünme kaybı, çarklarda ve kanatlarda süngerleşme, metal yorgunluğu gibi sebepler bu düşüşün kaynakları arasındadır. Aynı türbin üzerinde farklı yıllarda yapılan testlerle, türbindeki performans düşüşü net bir şekilde gözlenebilmektedir. Brekke'nin türbindeki aşınmanın performansa etkisini görmek için yapmış olduğu çalışma sonucunda elde ettiği grafik Şekil 1'de örnek olarak sunulmuştur [24].



Şekil 1. Normal ve aşınmış türbinler için verimlilik eğrisi

Hidrolik ünitelerde mevcut durumun belirlenmesi, gözlemlenen eksikliklerin nedenlerinin tespit edilmesi, aşınmaların ile ilgili olası revizyonların belirlenmesi, yapılacak faaliyetlerin maliyet yönlü analiz edilmesi, rehabilite edilmiş bir ünitenin devreye alınması gibi uygulamalar performans testlerini zorunlu kılmaktadır [25]. Test yapılmadan bir ünitenin ne kadar iyi performans gösterdiğinin, ne kadar iyi performans gösterebileceğine kıyasla, değerlendirilmesi mümkün değildir. Generatörün çalışma aralığını ve hidrolik gücün kullanım oranını artırmak için yüksek verimlilik koşullarını aramak, santralde ekonomik çalışmayı desteklemek için aynı çalışma koşulları altındaki farklı ünitelerinin verimliliklerini karşılaştırmak ve böylece tek bir türbin-generatör ünitesinin çıktısını en üst düzeye çıkarmak gibi amaçlar ancak performans testleri ile mümkün hale gelebilir [26]. Ayırca performans testi, hidroelektrik santrali performansının kabul edilemez seviyelere düşmediğinden emin olmak için olmazsa olmaz bir uygulamadır [27].

Performans testleri kendi içerisinde farklı zorluklar barındırmaktadır. Verimlilik hesaplamasını gerçekleştirmek için, suyun konumundan kaynaklanan kinetik ve potansiyel enerjisi gibi parametrelerin bilinmesi gerekir. Bunların bilinebilmesi için de türbine giren suyun debisinin ölçülmesi gereklidir. Debinin ölçülmesi ise, hidrolik türbin testlerindeki en zor işlerden biridir [28]. Bunun için farklı metotlar geliştirilmiştir. Bu metotlar termodinamik, akustik, gibson, boya seyreltme, tracer gibi doğrudan (absolute) debi ölçüm metotları ve Winter-Kennedy (W-K) gibi dolaylı/bağıl (relative) debi ölçüm metotları olarak sınıflandırılmıştır [29, 30].

Debi ölçümünde kullanılacak metotun seçimi için birçok parametrenin bir arada değerlendirilmesi gerekir. Santralin ve sahanın fiziksel şartları, değişken çalışma koşulları, debi aralığı, basınç kaybı, işletme gereksinimleri, düşü, cebri borunun yapısı, test hedefleri, testlerin gerçekleşme süreleri, maliyet, doğruluk gereksinimleri, yasal düzenlemeler gibi unsurlar metot seçimini doğrudan etkilemektedir [29]. Doğrudan debi ölçüm metotları ile mutlak testler, dolaylı/bağıl debi ölçüm testleri ile endeks testleri yapılmaktadır. Bağıl metotlarda debi ölçümünden ziyade debi hesaplaması yapılmaktadır.

Literatürde konu ile alakalı farklı çalışmalara rastlanılmaktadır. Cyrenne [31], boya seyreltme metodu ile debi ölçümü hakkında teorik bilgiler sunmaktadır. Boya seyreltme metodunu maliyet açısından ucuz, doğru sonuçlar veren, güvenirliliği kanıtlanmış çok hassas bir prosedür olarak tanımlamakta ve testler için floresan boyanın özelliklerini sunarak rhodamine boyasını tavsiye etmektedir. Çalışmasında, testlerin aşamalarından, hazırlıklarından, hesaplamalarından bahsetmekte, florometrenin çalışma mantığını, uygulanan IEC standartlarını örnekler vererek göstermektedir. Muthukumar vd. [32], boya seyreltme metodu ile hidroelektrik santrallerinde debi ölçümü yapılması hakkında hem teorik hem de pratik bilgiler sunmaktadırlar. HES'lerde boya testi için kullanılan denklem ve boya testinin yapım şemasının ortaya konulduğu çalışma kapsamında, dikey Kaplan tipi ve dikey Francis tipi türbinlerin kullanıldığı iki farklı hidrolik santralde tek noktadan, sabit akış metodu kullanılarak debi ölçümleri yapılmıştır. Diğer yöntemlerin uygulanabilir olmadığı durumlarda bu metodun kullanılabileceğini, testin başarılı olması için boyanın karışma mesafesine dikkat edilmesi gerektiğini, santrallerin yapım aşamasında test için altyapının kurulmasının önemli olduğunu belirtmişlerdir. Liang ve Richardson [33], boya metodunun özellikle elverişsiz şartlarda belirli akış koşulları altında debi ölçümü yapılabilmesi için pratik çözümler sunduğundan bahsetmektedirler. Yöntemin doğruluğunun, enjekte edilen boya miktarının son konsantrasyonun ve ölçüm noktasına erişimindeki boya kaybının belirlenmesi ile anlaşılacağını, kullanılan RT boyanın milyarda bir mesabesinde belirlenebilir özellikte olduğunu ve boyadaki kaybın ihmal edilecek kadar az olduğunu belirttikleri çalışmada, örnek test sonuçlarını paylaşmaktadırlar. Pant vd. [34], radyoizleyici tekniği ile debi ölçümü üzerine çalışmalar yapmışlardır. Yapay izleyici olarak boyanın ve doğal izleyici olarak tuzun kullanılabildiği izleyici seyreltme tekniğini düzensiz şekilli, büyük çaplı, tamamen veya kısmen dolu boru hatlarında, açık-kapalı kanallarda kullanılabilecek en uygun metot olarak sunmuşlardır. Rodamin B gibi floresan boyalar yüksek seyreltmelerde tespit edilebilir olsa da, genellikle yatak, duvar ve toprakta süspansiyon halinde adsorpsiyon yoluyla su ortamından kaybolduklarını belirtmiş; oluşan bu dezavantajlı durumlardan bazılarının radyo izleyiciler yöntemi kullanarak aşılabileceğini söylemişlerdir. Bu metodun, daha yüksek tespit hassasiyetleri nedeni ile daha iyi doğrulukla daha büyük debileri için yararlı olduğunu, doğayı kirletecek atıklar barındırmadıklarını ayrıca belirtilmişlerdir [35]. Pala [36], türbin verimliliğini, verimliliği etkileyen hususları ve verimlilik ölçüm metotlarını incelemiştir. Ultrasonik ve termodinamik metotla verim ölçümü ile ilgili ayrıntılı bilgiler sunmuştur. Çalışmasında, Keban HES'te 1974 yılında faaliyete geçen ünite-4 ile 1982 yılında faaliyete geçen ünite-5 üzerinde termodinamik metotla, farklı güç ve düşü aralıklarında yapılan performans testinin sonuçlarını paylaşılmış, tamamen aynı özelliklerde imal edilen ve aynı çalışma koşullarında olan türbinlerin verimliliklerinin farklı bulunması üzerine analizler yapmıştır. Kafalı [37], santrallerde verimlilik artırıcı rehabilitasyonlara başlamadan önce, mevcut verimlilik durumunun teorik ve gerçek performans testleri yapılarak tespit edilmesi gerektiğini söylemiştir. Bu amaçla, Gökçekaya HES'te hem teorik analizler yapılarak muhtemel verimlilik kayıpları hesaplanmış hem de Winter-Kennedy metodu ve akustik metot kullanılarak santraldeki Francis tipi türbinin gerçek

zamanlı performans testleri yapılmıştır. Yan vd. [38], Winter-Kennedy metodu kullanarak debi hesaplaması yaptıkları çalışmalarında, W-K akış hızı katsayısını Gibson yöntemi ile kalibre ederek, 300 MW Francis türbinde yapılan verimlilik testlerinin sonuçlarını açıklamışlardır. Test sonuçları kullanılarak türbin verimlilik eğrisini üretici tarafından sağlanan eğri ile karşılaştırmışlardır. Salyangozu da içerecek şekilde yapılan HAD (CFD) hesaplamaları, W-K debi hesaplama formülündeki katsayı K($\mathbf{K_1}$)'nin ve endeks n($\mathbf{K_2}$)'nin akış hızı üzerindeki etkisini analiz etmek için kullanmış, iki eğri arasında oluşan farkın temel nedeninin n ve K belirsizlik değerleri olduğunu belirtmişlerdir. Zhou vd. [39], türbin verimlilik ölçüm yöntemlerini, bu yöntemlerin özelliklerini, uygulamadaki zorluklarını incelemekte, termodinamik test yöntemi ile ilgili ayrıntılı bilgiler sunmaktadırlar. Termodinamik, ultrasonik ve Winter-Kennedy metotları arasında yaptıkları karşılaştırmalar neticesinde, yüksek düşüye sahip türbinlerde verimlilik ölçümü için termodinamik metodun daha uygun bir metot olduğunu belirtmektedirler. Baidar vd. [40], W-K yönteminin sorunlarını ve zorluklarını inceledikleri çalışmalarında, W-K metodunun uygulama olarak basit ve az masraflı bir yöntem olduğunu, genellikle yenileme projeleri için verimlilik artışını doğrulamak, bazen de sürekli debi akışını izlemek için santrallerde sıklıkla kullanıldığını belirtmektedirler. Farklı araştırma sonuçlarına göre testlerdeki belirsizliklerin çok yüksek ve tutarsız çıktığını, bu tutarsızlığın araştırmacılar tarafından ciddi bir analize tabi tutulmadan, daha çok yenileme sonrasına veya zaman içinde akış koşullarındaki değişikliklere atfedildiğini ifade etmektedirler. Ancak bundan ziyade, şartların özeliklerine göre yaklaşım geliştirilmesi gerektiğini, metodun kalibrasyonu doğru yapıldığında ve akış koşullarında değişiklik olmaması halinde debi ölçümü ve verimlilik testleri için uygun olduğunu açıklamışlardır. W-K metodu için son 20 yılda yapılan birçok araştırmada %10'a varan hataların bildirildiğini söyledikleri çalışmada, eski türbin ile kalibre edilmiş W-K akış katsayılarının yeni türbin için kullanılmasının, akış fiziği değiştiği için önerilmediğini belirtmektedirler. W-K araştırmalarında, W-K diferansiyel basınç musluklarının olduğu yerde hız alanı, basınç ölçümleri ve giriş koşullarının değiştirilmesi, musluklara yakın yerel akış bozukluklarında pürüzlülüğün etkisi, türbin, ayar kanadı, boşluk aralığı, değişen kanat eğimi gibi akış geometrisindeki değişikliğin etkisi vb. durumların metot bağlamında araştırılmasını önermişlerdir [41]. Farklı bir çalışmalarında [42], farklı koşullardaki iki Kaplan tipi türbin üzerinden hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonlarının yardımı ile W-K yönteminin sınırlamaları daha iyi anlaşılmaya çalışılmıştır. Bir başka çalışmalarında ise [43], düz ve eğri cebri borularda, değişen akışlarda W-K metodu ile debi ölçümleri yapılmış, metodun kararlılığının arkasındaki fiziksel mekanizma sunulmuştur. Jain vd. [20], Francis tipi reaksiyoner bir türbinin fiili çalışmaya geçmeden önce performansına ait tahmini değerlerini HAD yaklaşımı ile belirlenme yoluna gitmiş, ortaya çıkan değerleri model test yöntemi ile doğrulamaya çalışmışlardır.

Literatüre bakıldığında aynı türbin-generatör ünitesi üzerinde farklı metotlar kullanılarak performans testlerinin yapıldığına dair çalışmalara rastlanılmamaktadır. Aynı türbin üzerinde aynı metot kullanılarak farklı zamanlarda yapılan uygulamalara ise çok az rastlanılmaktadır. W-K metodu ile sürekli verimlilik izlemenin yapıldığı santrallerde ise akış sabitinin belli aralıklarda mutlak debi ölçüm metotları ile kalibre edilmesi gerektiği söylenmiştir ancak böyle bir çalışmaya da rastlanılmamıştır.

Bu çalışmada, Boya seyreltme (dye delition) ve Winter-Kennedy (W-K) debi ölçüm metotları uygulanarak Alpaslan-1 HES'te türbin performans testleri yapılmıştır. Bir ünitede gerçekleştirilen testlerde kullanılmak üzere Efficiency Monitoring System (EMS), yani Verim İzleme Sistemi (VİS) kurulumu gerçekleştirilmiştir. Testler için gerekli olan veriler VİS ve üzerinden toplanılmıştır. Mutlak ve endeks testleri yapıldıktan sonra VİS'te herhangi bir değişiklik yapılmamış, sistem faal olarak bırakılmıştır. Böylece ilgili ünitede verim izlemenin W-K metodu kullanılarak aralıksız yapılmasına imkân sağlanmıştır. Sistem kurulurken verilerin toplanması için santraldeki mevcut ölçüm aletlerinin bir kısmından faydalanılmıştır. Herhangi bir ölçü aleti olmayan lokasyonlarda ihtiyaca binaen harici olarak yerleştirilen enerji analizörleri, basınç sensörleri/transmitter üzerinden veriler toplanılmıştır. Boya testleri için ayrıca, Florometre ve Veri Kayıt Cihazı (DAQ) kullanılmıştır.

Çalışmamız, aynı çalışma koşulları altında aynı ünitede farklı metotlar kullanarak testlerinin yapılması ve bu veriler üzerinden testlerin doğruluklarının karşılaştırmalı incelenmesi yönü ile literatüre özgün bir katkı sunmaktadır.

Materyal ve Metod

Hidrolik türbin performans testleri 2019 yılında nisan ayı içerisinde ünite-3'te gerçekleştirilmiştir. Muş sınırları içerisinde Murat Nehri üzerine inşa edilmiş olan santral, Elektrik Üretim A.Ş.'ye bağlı olarak 2012 yılında elektrik enerjisi üretimine başlamıştır. 4 adet türbin-generatör ünitesi bulunan baraj tipi santralin kurulu gücü 180 MVA olup generatörlerin tasarım verimi %98.3, türbinlerin tasarım verimi %95.4'tür. Türbinler 41.75 MW güçte, 250 d/d nominal sekron hızda, 55.4 m^3/s nominal debide çalışacak şekilde üretilmişlerdir. Santralin nominal brüt düşüsü 82.5 m, nominal net düşüsü 80.6 m'dir [44].

VİS'in kurulumu ve türbin performans testleri EÜAŞ'ın koordinasyonunda ve yürütücülüğünde; HATCH Ltd. şirketi ile SU-ENER Mühendislik ve Enerji Hizmetleri San. ve Tic. Ltd. Şti. firmalarının katkıları ile yapılmıştır.

Santralde performans testleri normal işletme aralığında, %50-100 ayar kanat açıklıkları arasında, ünitenin güç faktörü 1.0 alınarak gerçekleştirilmiştir. Santral kumanda odası üzeriden ünitenin devreye alınması ve çıkarılması, ayar kanat açıklıklarının ayarlanması gibi gerekli işlemler yapılmıştır. VİS üzerinden bütün veriler toplanarak, türbin verimlilik hesaplaması gerçekleştirilmiştir. Generatör, ünite, santral verimlilik hesaplamalarında VİS'ten elde edilen veriler kullanılmıştır. Testlerin hangi ayar kanat açıklıklarında ve düzene göre yapıldığı, hangi noktalarda iki testinde gerçekleştirildiği Tablo 1'de sunulmuştur [44].

Tablo 1. Testlerin gerçekleştirilme düzeni ve planlaması

Test Numarası	Ayar Kanadı Açıklığı (%)	Generatör Gücü (MW)	Yorumlama
0b	0	0	Devre Dışı Bırakma Kontrolü
1	51.1	21.3	Endeks
2	80.4	40.7	Endeks
3	85.3	43	Endeks+Boya
4	99.2	47.5	Endeks
5	90.5	44.6	Endeks
6	95.1	46.4	Endeks+Boya
7	70.5	34.4	Endeks
8	75	38	Endeks+Boya
9	60.5	27.8	Endeks
10	65	30.7	Endeks+Boya
0c	0.1	0	Devre Dışı Bırakma Kontrolü

Boya testlerinde,

- Test için Rhodamine WT floresan boyadan yararlanılmıştır. Kullanılacak boyanın miktarı tartılarak belirlenmiştir.
- Boya çözeltisi enerji kapaklarının bulunduğu yerden enjekte edilmiştir. Örnek numuneler salyangoz girişindenden toplanılmıştır. Bu iki yer arasındaki mesafe, yani cebri boru uzunluğu çözeltinin karışımı için uygun bulunmuştur.
- Ön karışım için baraj rezervuar kısmına bir pompa indirilmiştir. Boya solüsyonu ile suyun karışımı ara bir monifolda sağlanmıştır.
- Sabit debide boya enjeksiyonu yapılmıştır. Boya enjeksiyon hızını takip için laboratuar tipi tartı kullanılmıştır. Bilgiler bir bilgisayara aktarılarak, izlenmiştir.
- Flometrik analiz için her testte 8 kap numune çözelti alınmıştır [45].
- Boya testlerinin sayısı ve yapıldığı ayar kanat açıklıkları Tablo 1'de sunulmuştur.

Endeks testlerinde;

- Winter-Kennedy diferansiyel basınç tapalarının salyangoz içerisinde mevcut olduğu görülmüştür.
- Fark basınç tapalarından çekilen piyezometre boruları üzerinden Fark basınç sensörüne taşınmıştır.
- W-K akış sabiti boya testi ile kalibre edilmiştir.
- Testlerin sayısı ve yapıldığı ayar kanat açıklıkları Tablo 1'de sunulmuştur.
- Bazı testler tekrar edilmiştir [46].

Devre dışı halde okuma alınması sırasında (0b, 0c) türbin girişindeki basınç transdüserlerinden alınan statik basınç okumaları ile belirtilen göl suyu (yükleme havuzu) seviyesi okumaları arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Basınç okuması, elle mezura daldırılarak yapılan ölçümle oldukça uyumlu çıkmıştır ancak kontrol dairesindeki okumalar basınç okumalarının yaklaşık 0,8 m üstünde düşü su seviyesi göstermiştir. Bu testin amaçları doğrultusunda VİS giriş basınç transdüserinden alınan okumalar kullanılarak türbin giriş basıncı hesaplanmaktadır.

W-K akış sabiti aşağıdaki formül ile bulunmuştur.

$$Q = (K_1)\Delta P^{K_2} \quad (1)$$

Burada;

$\boldsymbol{K_1}$: W-K Akış Sabiti,

Q: Debi,

$\Delta \boldsymbol{P}$: Fark Basıncı

W-K akış sabiti bulunurken, denklemde kullanılan debi, boya testlerinde ölçülen debidir. Fark basınç ise salyangoz içerisinde farklı noktalara yerleştirilmiş olan tapalar üzerinden alınan değerdir. Akış sabiti bulunduktan sonra ise fark basınç bilgisi ve akış sabiti kullanılarak, aynı denklem bu kez debi hesabı için kullanılmaktadır. Böylece anlık olarak debinin izlenmesi mümkün olmaktadır. Denklemdeki K_2 endeks değeri, IEC-41 standarları kapsamında 0.48-0.50 aralığında bir değer olarak alınmakta ancak genelde 0.5 olarak kullanılmaktadır [47]**.** Hesaplanan akış sabiti sadece o ünitede ait olduğundan, başka bir ünitede kullanılmamaktadır. Debi hesabının düzenli ve anlık yapılabilmesi için akış sabitinin VİS'e ait PLC programına yüklenmesi gerekir.

Boya seyreltme testlerinde ayrıca, sekiz 20-mA kanallı ve 32 ±200-mV kanallı iki harici 16-bit analog-dijital modülden oluşan veri toplama cihazı (Data Acquisition System (DAQ)) kullanılmıştır. LabView yazılımı bulunan (DAQ yazılımı) bir bilgisayar üzerinden çıkış sinyalleri kaydedilmiştir. Veri toplama sistemi tarafından kaydedilen enstrümentasyon sinyalleri şunlardır;

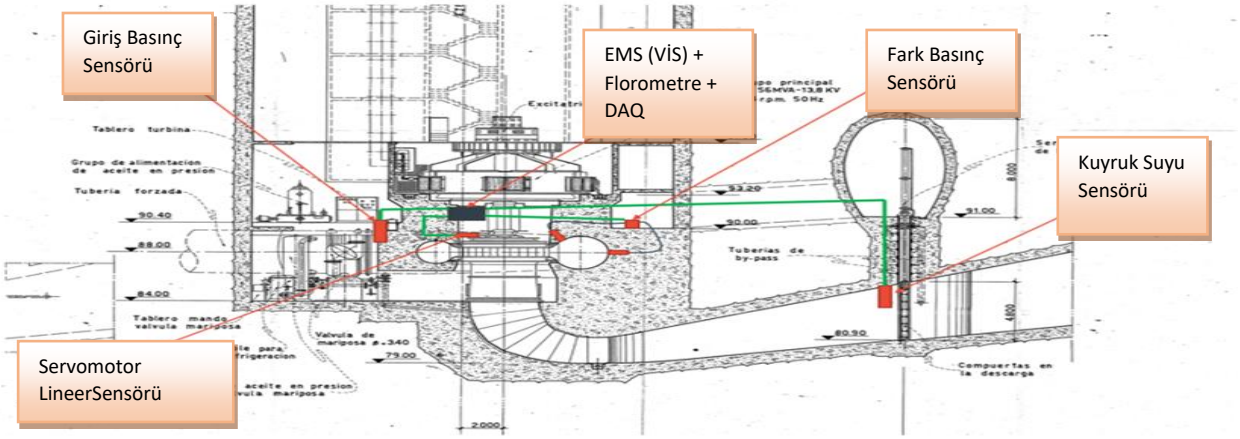
- Saha Florometresi kullanılarak flüoresans değeri,
- Bir 200-psi basınç transdüseri kullanılarak elde edilen türbin giriş basıncı değeri.

Ayrıca her test sırasında ise VİS tarafından aşağıdaki değerler eşzamanlı olarak okunmuştur;

- Salyangoz giriş basınç tapalarından gelen değerler,
- Kuyruk suyu seviye değeri,
- Türbin ayar kanadı servomotor pozisyon bilgisi,
- Generatör çıkış gücü,
- Salyangoz içerisindeki fark basınç tapalarından gelen değerler (Winter-Kennedy Diferansiyel Basınç değerleri).

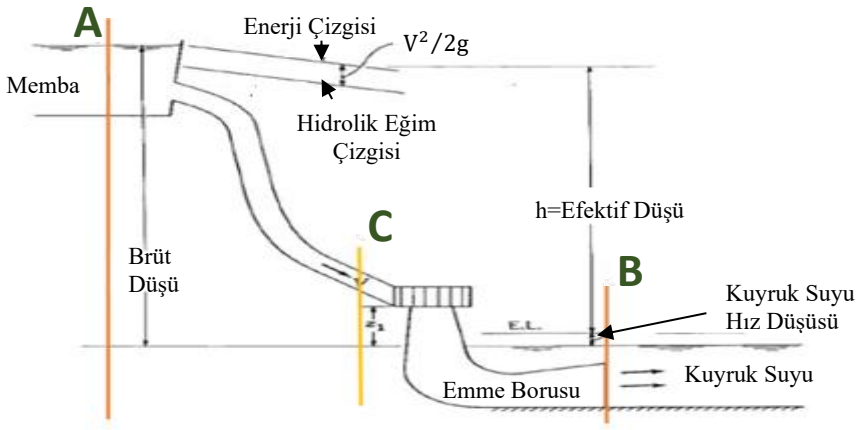
Boya numunelerinin toplanması için kurulan florometre, DAQ cihazı, veri kayıt bilgisayarı, her iki testte kullanılan VİS'e ait pano, net düşü hesaplamalarında kullanılan giriş basınç sensörü, W-K metodu ile debi hesaplamasında kullanılan fark basınç sensörleri, cebri boru girişinde boya enjeksiyonu için dalgıç tipi boyanın membaya indirilmesi ve boya çözeltisinin enjeksiyonu, boyanın enjeksiyonu için oluşturulan düzenek Şekil 2'de, her iki test için gerekli olan verilerin sensörler üzerinden toplandıkları lokasyonlar ise Şekil 3'te gösterilmiştir [30]**.**

Şekil 2.(a) (1)Florometre, DAQ, Veri kayıt bilgisayarı, (2)Giriş basınç ve fark basınç sensörleri, (3)VİS panosu, (b) Cebri boru girişinde boya enjeksiyonu, (c) Boya enjeksiyon düzeneği



Şekil 3. Verilerin toplanıldığı lokasyonla

Testlerin yapılmasında gerekli olan önemli verilerden biri de düşü değeridir. Santrallerdeki enerji çizgileri üzerinden istenilen düşüler berneolli denklemi kullanılarak hesaplanmaktadır [48]. Enerji çizgileri Şekil 4'te gösterilmiştir [37, 30].



Şekil 4. Hidroelektrik santrallerde enerji çizgileri

Buna göre, A-B enerji çizgileri arasında denklem yazılarak brüt düşü, C-B enerji çizgileri arasında denklem yazılarak net düşü hesaplanmıştır. Brüt düşü santral verimliği hesabında, net düşü türbin ve ünite verimliliği hesabında kullanılmaktadır. Brüt düşü hesaplaması yapılabilmesi için testler esnasında göl kodunun ölçülmesi gerekmektedir. Bunun için santralde kurulu olan seviye sensörlerinden faydanılmıştır.

Bulgular ve Tartışma

Alpaslan-1 HES Ünite-3'te yapılan testlerde elde edilen değerler Tablo 2'de sunulmuştur [44].

Tablo 2. Performans testi sonuçları

Test No	Ayar Kanat Açıklığı (1) (%)	Memba Su Seviyesi (2) (m)	Türbin Giriş Basınç Tapası			Emme Borusu Çıkış			Ölçülen Generatör Gücü (9) (MW)	Ölçülen Ünite Debisi (10) (m3/s)	Generatör Verimi (11) (%)	Ölçülen Net Düşü (12) (m)	Ölçülen Brüt Düşü (13) (m)	Nominal Net Düşüye Göre Düzeltme			Brüt Düşüye Göre Düzelt. Gen. Gücü (17) (MW)	Santral Verimi (18) (%)	Ünite Verimi (19) (%)	Türbin Verimi (20) (%)
			Statik Düşü (3) (m)	Hız Düşüsü (4) (m)	EGL1 (5) (m)	Statik Düşü (6) (m)	Hız Düşüsü (7) (m)	EGL2 (8) (m)						Generatör Gücü (14) (MW)	Ünite Debisi (15) (m3/s)	Net Düşü (16) (m)				
Kapatma Kontrolü																				
Test0b2.out	0.00	1442.68	1443.01		1443.01	1367.92		1367.92				75.09	74.76							
Endeks Testi																				
Test1.out	51.07	1442.65	1441.74	0.70	1442.44	1367.93	0.09	1368.02	18.80	31.67	96.7%	74.43	74.72	21.19	32.96	80.60	21.81	81.3%	81.6%	84.3%
Test2R.out	80.42	1442.69	1440.01	2.08	1442.09	1368.15	0.26	1368.41	35.45	54.64	98.0%	73.68	74.54	40.56	57.14	80.60	41.28	89.0%	90.1%	91.9%
Test3R.out	85.27	1442.69	1439.65	2.35	1442.00	1368.22	0.29	1368.51	37.30	57.99	98.1%	73.49	74.47	42.84	60.73	80.60	43.49	88.3%	89.5%	91.2%
Test4R.out	99.22	1442.69	1438.75	3.03	1441.78	1368.23	0.37	1368.60	40.90	65.88	98.2%	73.18	74.46	47.28	69.15	80.60	47.70	85.3%	86.8%	88.3%
Test5.out	90.53	1442.68	1439.30	2.58	1441.88	1368.20	0.32	1368.52	38.60	60.79	98.2%	73.36	74.48	44.45	63.72	80.60	45.00	87.2%	88.5%	90.2%
Test5R.out	90.70	1442.71	1439.29	2.63	1441.92	1368.20	0.32	1368.52	39.00	61.44	98.2%	73.40	74.51	44.88	64.38	80.60	45.44	87.1%	88.5%	90.1%
Test6.out	95.11	1442.68	1438.99	2.84	1441.83	1368.24	0.35	1368.59	40.00	63.83	98.2%	73.24	74.44	46.18	66.95	80.60	46.67	86.1%	87.5%	89.1%
Test6b.out	95.11	1442.69	1438.99	2.84	1441.83	1368.24	0.35	1368.59	40.00	63.83	98.2%	73.24	74.45	46.18	66.95	80.60	46.66	86.1%	87.5%	89.1%
Test7.out	70.53	1442.69	1440.69	1.54	1442.24	1368.09	0.19	1368.28	30.10	47.01	97.7%	73.96	74.60	34.25	49.07	80.60	35.01	87.8%	88.6%	90.6%
Test8a.out	74.96	1442.69	1440.34	1.82	1442.16	1368.12	0.22	1368.34	33.20	51.11	97.9%	73.82	74.57	37.88	53.40	80.60	38.63	89.1%	90.0%	91.9%
Test9.out	60.55	1442.70	1441.30	1.09	1442.38	1368.07	0.13	1368.20	24.50	39.49	97.3%	74.18	74.63	27.75	41.16	80.60	28.48	85.0%	85.6%	87.9%
Test10.out	65.03	1442.71	1441.03	1.29	1442.33	1368.02	0.16	1368.18	27.00	43.07	97.5%	74.15	74.69	30.60	44.90	80.60	31.34	85.9%	86.5%	88.7%
Boya Testi																				
Test3a.out	84.59	1442.69	1439.61	2.30	1441.91	1368.22	0.28	1368.50	37.00	57.45	98.1%	74.41	74.47	42.57	60.20	80.60	43.14	88.5%	89.7%	91.5%
Test6.out	95.11	1442.69	1438.99	2.78	1441.77	1368.24	0.34	1368.58	40.00	63.07	98.2%	74.19	74.45	46.23	66.19	80.60	46.66	87.1%	88.6%	90.3%
Test8a.out	74.96	1442.69	1440.34	1.82	1442.16	1368.12	0.22	1368.34	33.20	51.09	97.9%	74.81	74.57	37.88	53.39	80.60	38.63	89.1%	90.0%	91.9%
Test10.out	65.03	1442.71	1441.03	1.29	1442.32	1368.02	0.16	1368.18	27.00	42.96	97.5%	74.14	74.69	30.60	44.79	80.60	31.34	86.1%	86.7%	88.9%
Kapatma Kontrolü																				
Test0c.out	0.07	1442.71	1442.71		1442.71	1368.12		1368.12				74.59	74.59							

Tablo 2'deki sütunların açıklamaları ve yapılan hesaplamalar;

1. Ayar kanadı (servomotor) açıklığı (%).

2. Memba su seviyesi (m).

3. Türbin girişindeki muslukların statik düşüsü, türbin girişindeki EMS basınç ile ölçülmüştür (m).

4. Türbin giriş musluklarındaki hız düşüsü, türbin deşarjı ve en kesit alanı kullanılarak hesaplanmıştır

(m),

$$V^2/2g \quad (2)$$

5. Türbin girişindeki musluklardaki enerji çizgisi (m) = (T3) + (T4).

6. Emme borusu çıkışındaki statik düşü (m), elle mezura daldırılarak ölçülmüştür.

7. Emme borusu çıkışındaki hız düşüsü, türbin deşarjı ve en kesit alanı kullanılarak hesaplanmıştır (m).

8. Emme borusu çıkışındaki enerji çizgisi (m) = (T6) + (T7).

9. Generatör Gücü, santraldeki çok fonksiyonlu ölçüm cihazı kullanılarak ölçülmüştür (MW).

10. Türbin debisi (m^3/s)

11. Benzer makinelerin performans garantilerinden alınan generatör verimi değeri (%)

12. Türbin Net düşüsü (m) = (T5) - (T8)

13. Türbin Brüt düşüsü (m) = (T2) - (T6)

14. Düzeltilmiş Generatör Gücü denklemi

$$P_{\text{düzeltilmiş}} = P_{\text{gen}} \left(H_{\text{nominal net}}/H_{\text{Ölçülen net}}\right)^{1,5} \quad (3)$$

15. Düzeltilmiş Türbin Debisi denklemi;

$$Q_{\text{düzeltilmiş}} = Q \left(H_{\text{nominal net}}/H_{\text{Ölçülen net}}\right)^{0,5} \quad (4)$$

16. Düzeltilmiş Net Düşü (m), Hrated

17. Brüt Düşüye Göre Düzeltilmiş Generatör Gücü denklemi;

$$P_{\text{düzeltilmiş}} = P_{\text{gen}} \left(H_{\text{nominal brüt}}/H_{\text{Ölçülen brüt}}\right)^{1.5} \quad (5)$$

18. Santral verimi (%) denklemi;

$$\text{Santral verimi} = \frac{(T9)}{\rho g (T13)(T10)} \quad (6)$$

19. Ünite verimi (%) denklemi;

$$\text{Ünite verimi} = \frac{(T9)}{\rho g (T12)(T10)} \quad (7)$$

20. Türbin verimi (%) denklemi;

$$\text{Türbin Verimi} = \frac{(T19)}{(T11)} \quad (8)$$

Denklemlerde (T3), (T4) …. (T19) vs. olarak belirtilen numaralar, Tablo 2'deki sütün numaralarına (T19: Tablo 2'de 19 numaralı başlık altındaki değer) atıf yapmaktadır.

g: Yer çekim kuvveti ($\boldsymbol{m/s^2}$),

ρ: Suyun yoğunluğu ($\boldsymbol{kg/m^3}$),

V: Akışkanın hızı (m/s)

Generatör kayıpları ve şaft milindeki güç

$$P_{\text{Şaft}} = P_{\text{gen}} + P_{\text{kayıp}} \quad (9)$$

$$P_{\text{kayıp}} = AP_{\text{gen}}{}^2 + BP_{\text{gen}} + C \quad (10)$$

denklemleri ile bulunur. $A = -4.167 \times 10^{-4}$, $B = 8.583 \times 10^{-2}$, $C = 93.9$ generatör sabiteleridir.

Fark basınç sensöründen alınan değer ile boya seyreltmede ölçülen Q=57.45 m^3/s debi kullanılarak unite-3 W-K akış sabiti değeri, K_1 =3.47 $m^3/s/\sqrt{kPa}$ bulunmuştur. Fark basınç sensörünün okuduğu 'mbar' değeri, VİS'te pascal (pa) değerine dönüştürülerek kullanılmıştır. Testlerde ölçülen net düşü değerine göre bulunan sonuçlar, yakınlık yasaları kullanılarak santralin nominal ve brüt düşü değerine göre de normalleştirilmiştir.

W-K metodu kullanılarak yapılan endeks testlerde, en yüksek türbin verimi %91.9 olarak ölçülmüştür. Bu değere %80.42 ve %74.96 ayar kanat açıklıklarında ulaşılmıştır. Bu ayar kanat açıklıklarında ünitenin ölçülen debisi 54.64/51.11 m3/s olmuşken, ölçülen net düşü değeri 73.68/73.82 m olmuştur. %80.42 ayar kanat açıklığında ünite verimi %90.1, santral verimi ise %89 bulunmuştur. Testlerde en yüksek generatör verimi, maksimum çıkış gücünde %98.2 olarak hesaplanmıştır. Bu değere %99.22 ayar kanat açıklığında ulaşılmıştır. Bu noktada ünitenin öçülen debisi 65.88 m^3/s olmuşken, ölçülen net düşü 73.18 m olarak gerçekleşmiştir. Bu düşü değerinde elde edilen 40.9 MW'lık en yüksek generatör çıkış gücü nominal net düşü değeri olan 80.6 m'ye göre normalleştirildiğinde, 47.28 MW olarak hesaplanmıştır. Kurulum projesinden alınan generatör verimlilik katsayıları kullanılarak generatördeki kayıpların hesaplamaları yapılmış ve bu generatör verimine göre şaft milindeki güç 48.34 MW bulunmuştur.

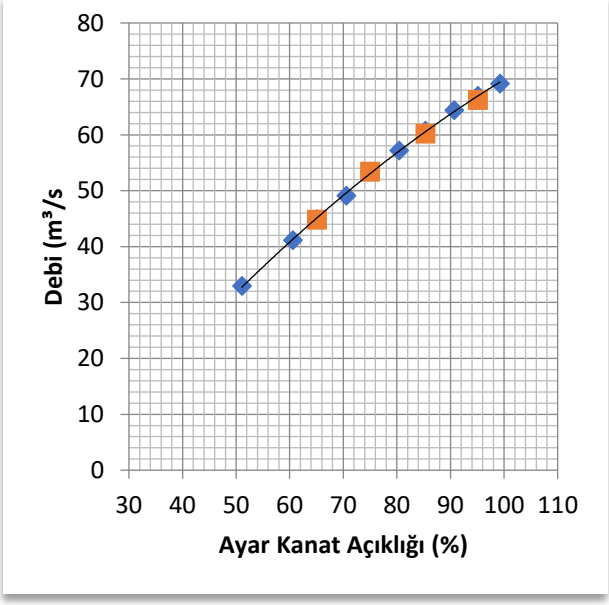
Boya seyreltme (dye delition) metodu kullanılarak yapılan mutlak testlerde, en yüksek türbin verimliliği %91.9 olarak ölçülmüştür. Bu değere %74.96 ayar kanat açıklığında ulaşılmıştır. Bu noktada ünitenin ölçülen debisi 51.09 m^3/s olmuşken, ölçülen net düşü değeri 73.81 m olmuştur. Ölçülen generatör çıkışının 33.20 MW olduğu bu ayar kanat açıklığında gerçekleşen generatör verimi %97.9 olmuştur. Santral ve ünite veriminin en yüksek olduğu yer %74.96 ayar kanat açıklığında

olmuştur. Bu noktada santral verimi % 89.1 iken, ünite verimi %90 olmuştur. Generatör verimi %95.11 ayar kanat açıklığında en yüksek değerine ulaşmış ve %98.2 olarak bulunmuştur. Bu noktada ünitenin ölçülen debisi 63.07 m^3/s, ölçülen net düşü değeri ise 73.19 m'dir. Generatör çıkış gücü, 80.6 m olan santralin nominal net düşü değerine normalleştirildiğinde ise 46.23 MW olarak bulunmuştur. Buna göre bu generatör verimde şaft milindeki aktif güç 47.07 MW olarak hesaplanmıştır.

Test sonuçlarının analizi için Tablo 2'de sunulan değerler üzerinden, farklı parametreler baz alınarak grafiklerler oluşturuldu. Aşağıda sunulan grafiklerde kırmızı renk ile gösterilen noktalar boya testlerinin sonuçlarını, mavi renk ile gösterilen noktalar ise endeks testlerinin sonuçlarını göstermektedir. Grafiklerdeki polinom eğrisi endeks test sonuçlarına göre oluşturulmuştur. Endeks testlerinden elde edilen polinoma boya testlerinden elde edilen değerler işlenmiş, iki test sonuçları arasında uyumluluk aranmıştır.

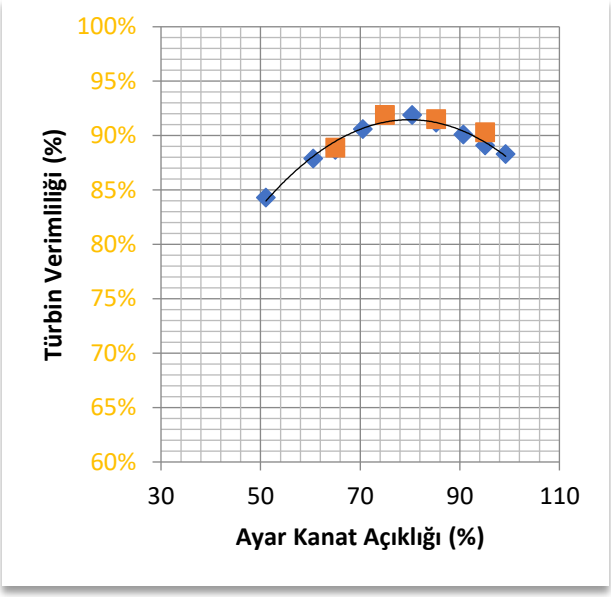
Nominal net düşüye göre oluşan grafikler

Tablo 2'de santralin nominal net düşüsü olan 80.6 m göre düzenlenmiş değerler baz alınarak, farklı parametrelerde grafik oluşturulduğunda aşağıdaki bulgular elde edilmiştir. Boya testleri, endeks testleri ile aynı ayar kanat açıklığında olacak şekilde, 4 farklı açıklıkla gerçekleştirildi. Debi her test için ayrı ayrı ölçüldü. Buna göre %85.27(84.59)/95.11/74.96/65.03 ayar kanat açıklıklarında yapılan endeks testlerinde nominal net düşüye göre normalleştrilmiş debiler sırası ile 60.73/66.95/53.40/44.90 m^3/s olurken; boya testlerinde 60.20/66.19/53.39/44.79 m^3/s oldu. İki testteki debi ölçümleri arasında farklar mevcuttur ancak oluşan değerlerin birbiri ile uyumlu olduğu söylenebilir. Diğer taraftan, ayar kanat açıklığı artıkça ölçülen debi değerinde de artış olması beklenir. Bütün testler grafiğe işlendiğinde iki parametre arasında doğrusala yakın bir ilişki olduğu doğrulandı. Ayar kanat ile debi ilişkisini gösteren grafik Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 5. Ayar kanat açıklığı-debi ilişkisi

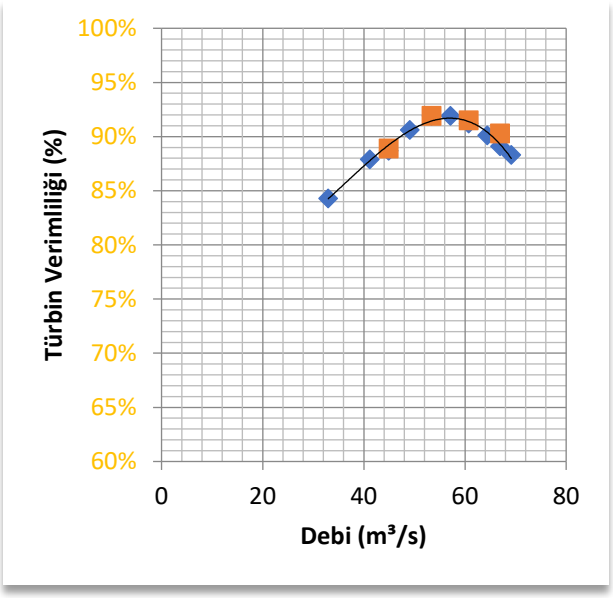
Ayar kanat açıklığı arttığında ölçülen debi miktarı doğru orantılı artarken, türbin verimliliğinde böyle bir ilişki beklenmez. Zaten testlerin bir amacı da türbinin farklı ayar kanat açıklıklarında ve debilerde verimli çalışma aralığını belirlemektir. Endeks testlerinde en düşük ayar kanat açıklığı olan %51.07'de türbin verimliliği %84.3 olurken, en yüksek ayar kanat açıklığı olan %99.22'de türbin verimliliği %88.3 olarak ölçüldü. Türbinin veriminin en yüksek olduğu %91.9'luk değere, %80.42/74.96 ayar kanat açıklıklarında ulaşıldı. Boya testlerinde 4 farklı ayar kanat açıklığında elde edilen türbin verimlilik oranları sırası ile %91.5/90.3/91.9/88.9 iken, aynı kanat açıklığında yapılan endeks testlerinde bu değerler %91.2/89.1/91.9/88.7 oldu. İki testin türbin verimliliği ölçümleri noktasında uyumlu olduğu görüldü. Ayar kanat açıklığı ile türbin verimliliği arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil 6'da sunulmuştur.



Şekil 6. Ayar kanat açıklığı-türbin verimliliği ilişkisi

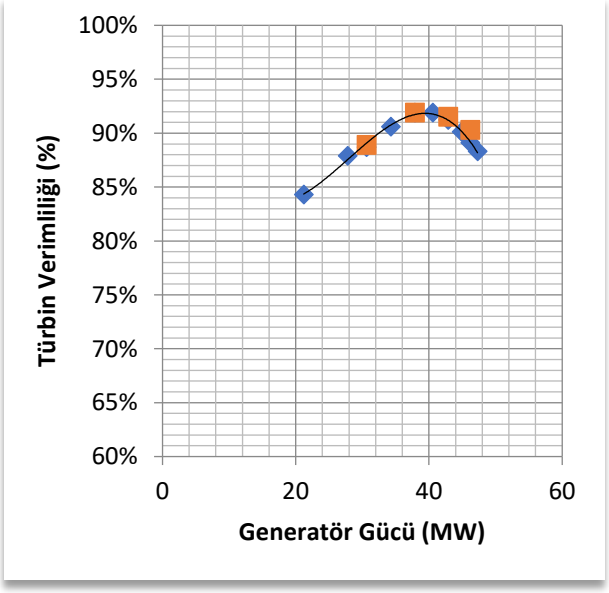
İlgili parametrelere ait veriler grafiğe işlendiğinde, ayar kanat açıklığı arttıkça türbin verimlilik eğrisinin önceklikle artış gösterdiği, eğrinin bir pik noktasına ulaştıktan sonra düşüşe geçtiği görülmektedir. Debi ölçümleri ile türbin verimliliği kıyaslandığında da benzer grafik ortaya çıkmaktadır.

Endeks testlerinde, normalleştirilmiş debi en düşük değer olan 32.96 m^3/s iken türbin verimliliği %84.3 olarak ölçüldü. Debi en yüksek değer olan 69.15 m^3/s iken türbin verimliliği %88.3 olarak ölçüldü. %91.9'luk en yüksek türbin verimlilik değerine ise 57.14/53.40 m^3/s debide ulaşıldı. Boya testlerinde de en yüksek verimlilik değerlerine 53.39 m^3/s değerinde ulaşıldı. Debi-türbin verimliliği arasındaki ilişki Şekil 7'de sunulmuştur.



Şekil 7. Debi-türbin verimliliği ilişkisi

Endeks testlerinde, generatör çıkış gücü en düşük değer olan 21.9 MW iken, türbin verimliliği %84.3 olarak ölçüldü, generatör gücünün en yüksek değer olan 47.28 MW'ta ise türbin verimliliği %88.3'tür. Ancak türbinin en verimli olduğu değer olan %91.9'da generatör çıkış gücü 40.56/37.88 MW olarak ölçüldü. Boya testlerinde de en yüksek generatör çıkış gücünde türbin verimliliği %90.3 iken, en düşük generatör çıkış gücünde türbin verimliliği %88.9'dur. Türbin verimliliğinin en yüksek olduğu %91.9'da, generatör çıkış gücü 37.88 MW'tır. 4 defa gerçekleştirilen boya testleri, endeks testleri ile aynı ünitede, aynı ayar kanat açıklığında yapıldığından, generatör çıkış gücü değerleride aynı olmuştur. Generatör çıkış gücü ile türbin verimliliği arasındaki ilişki Şekil 8'de sunulmuştur.



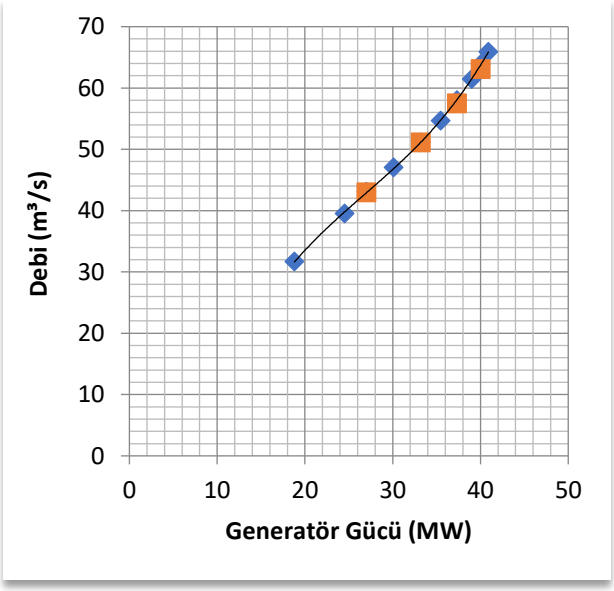
Şekil 8. Generatör çıkış gücü-türbin verimliliği ilişkisi

Ayar kanat açıklığı arttıkça generatör çıkış gücü artmaktadır. Ancak maksimin generatör çıkış gücü elde edilmesi, türbinin en iyi verimde çalıştığı anlamına gelmemektedir. Test sonuçlarına bakıldığında, türbin verimliliği ile ayar kanat açıklığı grafiğinde oluşan durumun bir benzerinin generatör çıkış gücü grafiğinde de oluştuğu görülmektedir.

Her iki performans testi sonuçlarında bir uyumluluk söz konusu olsa da, generatör çıkış gücü artıkça testlerde elde edilen ve grafiğe işlenerek kırmızı ve mavi olarak gösterilen verimlilik değerleri arasında farklılıkların olduğu görülmektedir. Bu farklılıkların debi ölçümlerinde elde edilen sonuçlardan kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Boya testlerinde yapılan debi ölçümlerinde belirsizlik katsayı oranı daha düşüktür ve ölçülen değer, gerçek değere daha yakındır. Endeks testlerinde ise salyangoz içerisindeki su hızı, sürtünme katsayıları, basınç, fark basınç sensörlerinin durumu, debi miktarınındaki değişiklik gibi etmenler bağıl debi hesaplamlamalarında sapmalar oluşturabilmektedir. Dolayısı ile aynı ayar kanat açıklığında yapılan farklı performans testlerinde farklı debi ölçüm sonuçlarının elde edilmesi beklenen bir durumdur. Aynı ayar kanat açıklığında boya testlerinde elde edilen debiler ile endeks testlerinde elde edilen debiler arasındaki uyum, boya testinin belirsizlik katsayısı düşük olduğunda, endeks teslerindeki debi hesaplamalarının doğruluğunun kontrol edilmesi olarak okunabilir.

Ölçülen debiye göre generatör gücü grafiği

Testlerde, ölçülen türbin debisi ile generatör çıkış gücü arasında doğrusala yakın bir ilişki olması beklenir. Tablo 2'de 9 ve 10 numaralı sütunlarda sunulan gerçek zamanlı değerlere bakıldığında, endeks testlerinde debi, en düşük oran olan 31.67m³/s olduğunda genaratör gücü en düşük değer olarak 18.80 MW'dır. Debi en büyük değer olan 65.88m³/s olduğunda generatör çıkış gücü de en yüksek seviyeye gelmekte ve 40.90 MW olmaktadır. Boya testlerinde de en yüksek debi değerinde generator çıkış gücü en yüksek değerde, 40 MW; en düşük debi değerinde Generatör çıkış gücü de en düşük değerde, 27 MW oldu. Generatör çıkış gücünün türbin debisi ile oluşan grafiksel ilişkisi Şekil 9'da sunulmuştur.



Şekil 9. Generatör çıkış gücü-debi ilişkisi

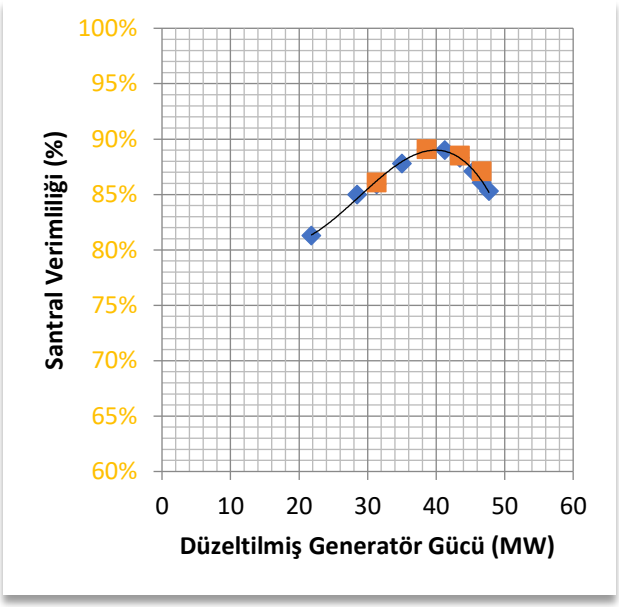
Brüt düşü değerine normalleştirilmiş generatör gücüne göre santral verimliliği grafiği

Santral verimliliği generatör çıkış gücücün brüt düşüden kaynaklı santral kurulu gücüne oranlanmasıyla, ünite verimliği ise generatör çıkış gücünün net düşüden kaynaklı türbinin girişindeki hidrolik güce oranlanmasıyla bulunur. Bu verimlilikler türbin verimliliği ile doğrusala yakın bir ilişkiye sahiptir ancak generatör verimliliği ile ilgili böyle bir ilişkiden bahsetmek mümkün değildir. Generatör verimliliği, generator çıkış gücünün şaft milindeki, yani türbin çıkışındaki mekanik güce oranlanması ile bulunur.

Tablo 2'de 11, 18, 19, 20 numarada verilen değerler incelendiğinde bu durum doğrulanmaktadır. Türbin veriminin en yüksek olduğu yerde santral ve unite verimlilikleri de en yüksek değerdeyken, generatör verimliliği en yüksek değerinde değildir. Aynı şekilde maksimum generatör çıkış gücü elde edilmesi santralin ve ünitenin en iyi verimde çalıştığı anlamına gelmemektedir. Tablo 2'de 17 numarada verilen ve santrala ait 82.5 m brüt düşüye göre düzenlenmiş olan generatör çıkış gücü baz alındığında bu durum doğrulanmaktadır. Endeks testlerinde, santral ve unite veriminin en düşük olduğu değer olan %81.3 ve %81.6 da, düzeltilmiş generatör çıkış gücü 21.81 MW iken, bu verimlilikler sırası ile %89.1ve %90'da en yüksek değerde iken düzeltilmiş generatör çıkış gücü 38.63 MW'tır. En yüksek düzeltilmiş generatör çıkış gücü değeri olan 47.70 MW ise santral verimi %85.3 ünite verimi %86.8 ölçüldü. Aynı durum boya testlerinin sonuçlarına bakıldığında görülmektedir. Dolayısı ile santralin çalışma şartları, üretilecek elektrik enerjisi türbin verimliliği göz önüne alınarak yapılması gerekir. Buna göre, generatör çıkış gücü ile türbin verimliliği endeksleri üzerinden santralin işletme aralıkları belirlenmelidir. Bu türbin-generatör ünitesinin uzun ömürlü olmasına, verimli çalışmasına katkı sağlayacaktır.

Santralde kurulu brüt düşüye göre en yüksek generatör çıkışının 47.70 MW olarak hesaplanması, 40 MW aktif çıkış gücüne sahip olan mevcuttaki generatörün çıkış gücününün artırılabileceğini göstermektedir. Bunun için nominal sekron hıza bağlı olarak generatör kutup sayısının değiştirilmesi gerekmektedir. Böyle bir proje ise kapsamlı bir fizibilite çalışmasına, detaylı bir maliyet analizine dayandırılmalıdır.

Brüt düşüye göre düzeltilmiş/normalleştirilmiş generatör çıkış gücü ile santral verimliliği arasındaki ilişki Şekil 10'da sunulmuştur.



Şekil 10. Düzeltilmiş generatör gücü - santral verimliliği ilişkisi

Sonuçlar

Hidroelektrik santrallerde mevcut hidrolik enerjinin ne kadarının mekanik enerjiye ve dolayısı ile elektrik enerjisine dönüştürüldüğünün tespit edilmesi, santralin verimliliğinin izlenmesi ve buna bağlı olarak santralde iyileştirme faaliyetlerinin yürütülmesi gibi çalışmalar ülkemizde çok yaygın değildir. Hidroelektrik tesislerde performans testlerinin yapılması hayati önem taşımakla beraber, zorlu bir faaliyettir. Hidroelektrik santralinin kapasitesi, suyun debisine ve düşüsüne bağlıdır. Bu değerlerden debi değerini ölçmek ise en zor iştir. Bu çalışma kapsamında boya seyreltme ve Winter-Kennedy debi ölçüm metotları kullanılarak performans testleri yapılmıştır. Sürekli verim izlemenin yapılması için Winter-Kenedy akış sabiti belirlenerek santralde bir ünitede verim izleme sistemi kurulmuştur. Testlerde en yüksek türbin verimi %91.9 olarak bulunmuştur. Buna göre %3.5'lik bir verim kaybının olduğu tespit edilmiştir. Generatörde ise %0,1 oranında ihmal edilebilecek seviyede verim kaybı söz konusudur.

Her iki test sonuçları karşılaştırıldığında, verilerin birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Verimlilik ölçümünden elde edilen bilgiler, santralin mevcut durumunun incelenmesinde, ileride yapılabilecek kapsamlı revizyonlar hakkında ekonomik ve mühendislik kararlar alınmasında kullanılmalıdır. Bu bilgilere ışığında, üretkenlik ve optimum işletme maliyeti göz önünde bulundurularak bakım stratejisi geliştirilmelidir. Bakım programında değişiklik, türbin tasarımında değişiklik, bakım için envanter düzenlemesi ve yüzey kaplama ile önleyici tedbirler, hidrolik türbinin üretkenliğini artırma gibi planlamalar bu stratejilerden bazıları olabilir.

Verimlilik ve maksimum güç çıkışı, hidrolik türbinlerde analiz edilecek en önemli hedeflerden ikisidir. Türbinler normalde değişken koşullarıda çalışırlar. Winter-Kenedy metodunun düşük ve yüksek debi değerlerinde, kısmi ve tam yükte çalışmada belirsizliklerinin farklılık

göstermesi, sadece bu metoda bağımlı kalınmamasını gerektirir. Verim izleme sistemimin sürekli faal olmasının yanı sıra, periyodik aralıklarla doğrudan debi ölçümleri ile testler yapılmalı ve W-K akış sabiti kalibre edilmelidir.

Geçmiş dönemlerde, performans ve verimlilik testleri pahalı ve yoğun emek gerektiren faaliyetler olarak görülmekteydi. Ancak, son yıllarda testlerin yürütülmesi süreçleri önemli ölçüde değişmiş bulunmaktadır. Test ekipmanları, yazılım ve donanım alanındaki gelişmeler, gereken kişi sayısını ve test alanına gönderilmesi gereken ekipman miktarını büyük oranlarda azaltmaktadır. Saha testini kolaylaştıran başka iyileştirmeler de söz konusudur. Yakın zamana kadar, basınç dönüştürücülerini kalibre etmek için test yerlerine ölü ağırlık test cihazının gönderilmesi gerekirdi, ancak günümüzde hafif, kullanımı kolay, taşınabilir bir kalibrasyon cihazıyla aynı görev rahatlıkla gerçekleştirilmektedir. Dolayısı ile bu testlerin yaygınlaştırılmasının önünde ciddi bir engel bulunmamaktadır. Bu kapsamda, santraldeki diğer ünitelerde de bu çalışamanın yapılması, zamanla ülkemizdeki bütün santrallerde bu faaliyetlerin yürütülmesi, bir tercih değil zorunluluk olarak görülmelidir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Çalışma yüksek lisans tezinden türetilmiştir.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yazar katkıları

Yazarlar makaleye eşit katkıda bulunmuşlardır.

Kaynaklar

[1] H. Akın," Su türbini tasarımı amaçlı sayısal yöntemler geliştirilmesi ve uygulaması," Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği ABD, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2014.

[2] F. Eraydın," Hidroelektrik santrallerde net düşü değişiminin aktif güç çıkışı üzerine etkisinin incelenmesi," Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği ABD, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye, 2019.

[3] A. Çoşkun, "Türkiye'de elektrik enerjisi sorunu ve ekonomik gelişmemizdeki önemi", *Sosyal Siyaset Konferansları Dergisi*, vol. 34, pp. 73-83, Feb. 2012.

[4] R. Shrestha, B. Thapa, P. Gautam, P. Upadhyay, "Productivity and efficiency measurement in hydraulic turbine," *10th. National Convention, Building New Nepal: Challenges and Opportunities*, Kathmandu, Nepal; Apr.11-13 2007.

[5] M. S. Güney, K. Kaygusuz, "Hydrokinetic energy conversion systems: a technology status review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 14, pp. 12996-3004, Dec. 2010, https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.06.016

[6] A. Kerim, V. Süme," İçmesuyu şebekelerinden enerji elde edilmesi; boru içi türbin modeli," *Türk Hidrolik Dergisi,* Vol. 5, no. 1, pp. 8-17, Jun. 2021.

[7] G. Urquiza, M. A. Basurto-Pensado, L. Castro, A. Adamkowski, W. Janick, "Flow measurement methods applied to hydro power plants," in *Flow Mmeasuremen*t, G. Urquiza, L. Castro Ed., London, England: Intech, 2012, pp.151-198, https://doi.org/10.5772/36508

[8] Ü. Beyazgül," Elektrik üreten bir piko su türbini performansının deneysel ve nümerik incelenmesi," Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği ABD, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2022.

[9] S. H. Vinchurkar, B. K. Samtani, "Performance evaluation of the hydropower plants using various multi-criteria decision-making techniques," *International Journal of Engineering and Advanced Technology,* vol. 8, no. 6, pp. 2131-2138, Aug. 2019, https://doi.org/10.35940/ijeat.F8490.088619

[10] C. P. Shea, "*Renewable energy: today's contribution, tomorrow's promise*", Washington, USA: Worldwatch Institute, 1988.

[11] S. Bozkurt, R. Tür, "Dünyada ve Türkiye'de hidroelektrik enerji, gelişimi ve genel değerlendirme" in *4. Su Yapıları Sempozyumu*, Antalya, Türkiye, 2015, pp. 322-330.

[12] EIA, U.S. Energy Information Administration. The world's nine largest operating power plants are hydroelectric facilities. https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=28392, Accessed on: October 22, 2024

[13] H. A. Mahauddin, I. Jauhari, N. N. Nik Ghazali, N. M. Sultan, S. Julai, "Development and performance testing of a new in-pipe hydropower prototype towards Technology Readiness Level (TRL) 6," *Cogent Engineering,* vol. 11, no. 1, pp. 1-17,2024, https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2319402

[14] IHA, Internatıonal Hydropower Assocıatıon. 2024 Word Hydropower Outlook. https://www.hydropower.org/publications/2024-world-hydropower-outlook, , Accessed on: October 25, 2024.

[15] Our Word in Data. Energy production and consumption (January 2024). https://ourworldindata.org/energy-production-consumption, , Accessed on: October 25, 2024.

[16] ETKB, Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı. Elektrik. https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik, , Accessed on: October 24, 2024.

[17] EÜAŞ, Elektrik Üretim Anonim Şirketi. Yıllık faaliyet raporu 2023. https://www.euas.gov.tr/raporlar,Accessed on: October 24, 2024.

[18] ETKB, Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı. Türkiye ulusal enerji planı 2022. https://enerji.gov.tr/duyuru-detay?id=20317,

[19] REN21, Renewables Now. Key facts hydropower. Renewables global status report. https://www.ren21.net/gsr-2023/modules/energy_supply/02_market_develop

ments/05_ hydropower/, Accessed on: October 25, 2024.

[20] S. Jain, R. P. Saini, A. Kumar, "Cfd approach for prediction of efficiency of francis turbine," in *8 th. International Conference on Hydraulic Efficiency Measurement (IGHEM)*, Roorkee, India; 2010, pp. 257-263.

[21] M. K. Shukla, R. Jain, V. Prasad, S. N. Shukla, "CFD analysis of 3-D flow for francis turbines", *MIT International Journal of Mechanical Engineering,* vol. 1, no. 2, pp. 93-100*,* Aug. 2011.

[22] B. Kavurmacı, K. Celebioglu, S. Aradag, Y. Tascioglu,"Model Testing of francis-type hydraulic turbines," *Measurent and Control*, vol. 50, no. 3, pp. 70-73, Jun. 2017, https://doi.org/10.1177/0020294017702284

[23] Z. Carija, Z. Mrsa, S. Fucak, "Validation of francis water turbine CFD simulations," *Strojarstvo,* vol. 50, no. 1, pp. 5-14, Mar. 2008.

[24] H. A. Brekke, "Discussion on pelton turbines versus francis turbines for high head plants Proceedings," in *Symp. ASCE-IAHR/ASME Colorado State Universty*, Colorado, USA, 1978, pp. 167-177.

[25] J. Steller, A. Adamkowski, A. Henke, W. Janick, M. Kaniecki, Z. Krzemianowski, "Discharge measurement and performance tests of hydraulic units in low-head small hydropower installations," *Transactions of the Institute of Fluid-Flow Machinery* vol. 130, pp. 3-29, Dec. 2015.

[26] Y. Li, M. Yu, j. Cheng, Y. Yin, J. Wang, "The application of turbine efficiency measurement in huge hydraulic power stations," in *12th. International Conference on Hydraulic Efficiency Measurement (IGHEM),* Beijing, China, 2018, pp. 1-5.

[27] C. Purece, L. Corlan, V. Pleşca, "Determination of turbine efficiency for small hydro power plants," *Journal of Sustainable Energy* vol. 11, no. 2, pp. 100-106, Dec. 2020.

[28] A. Adamkowski, W. Janicki, J. Kubiak, G. Urquiza, F. Sierra, J. M. Fernández, "Water turbine efficiency measurements using the gibson method based on special instrumentation installed inside pipelines," in *6th. International Conference on Innovation in Hydraulic Efficiency Measurements*, Oregon, USA, 2006, pp. 1-12.

[29] S. Ghosh, S. Mali, J. T. Kshirsagar," Performance testing of a low head small hydro power (SHP) plant-Zho Suwei (TAIWAN) –a case study," in *8th. International Conference on Hydraulic Efficiency Measurement (IGHEM),* Roorkee, İndia, 2010, pp. 44-54.

[30] J. Westermann, "Efficiency Improvement," presentedat the *EUAS IPA Training Program*, Ankara, Türkiye, Mar. 25-26, 2021.

[31] M. Cyrenne, "Flow measurement using the dye dilutioan technique," in *4th. International Conference on Hydraulic Efficiency Measurement (IGHEM),* Toronto, Canada, 2002, pp. 1-10

[32] U. Muthukumar, J. Chandapilli, S. Sasendra, "Flow measurement in hdroelectric stations using tracer dilution method – case studies," *8th. International Conference on Hydraulic Efficiency Measurement (IGHEM),* Roorkee, India, 2010, pp. 34-43

[33] W. S. Liang, E. V. Richardson, "Dye dilution method of discharge measurement," Colorada State Universty Water Management Technical Report, Report No: 3(CER 69/70-45), Oct. 22, 2024. Available: http://hdl.handle.net/10217/39018

[34] H. J. Pant, J. Biswal, S. Goswami, J. S. Samantray, V. K. Sharma, K. S. S. Sarma," Development and application of radiotracer dilution technique for flow rate measurements," *BARC Newsletter, Vol.* May – June, pp. 1-9, Jul. 2017.

[35] H. J. Pant, "Radiotracer applications in industry, the environment and research," in *Ionising Radiation and Manking*. D. V. Gopinath, N. Ramamoorthy, Ed. Newcastle, UK: Cambridge Scholars Publishing, 2020, pp. 211-264.

[36] R. Pala, "Hidroelektrik santrallerde türbin verimliliğinin termodinamik metotla ölçülmesi," Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği ABD, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 2007.

[37] K. Kafalı, "Hidroelektrik bir santralin teorik ve gerçek performansının karşılaştırılması," Yüksek lisans tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği ABD, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Osmaniye, Türkiye 2020.

[38] Z. G. Yan, L. J. Zhou, Z. Wang," Turbine efficiency test on a large hydraulic turbine unit. *Science China Technological Sciences* vol. 55, no. 8, pp. 2199–2205, Aug. 2012. https://doi.org/10.1007/s11431-012-4914-6

[39] Y. Zhou, P. Luoping, C. Dengfeng," Turbine efficiency measurement by thermodynamic test method*. International Journal of Fluid Machinery and Systems*, vol. 12, no. 4, pp. 261-267, Dec. 2019,https://doi.org/10.5293/IJFMS.2019.12.4.261

[40] B. Baidar, J. Nicolle, C. Trivedi, M. J. Cervantes," Winter-Kennedy method in hydraulic discharge measurement: problems and challenges," in *11th. International Conference on Hydraulic Efficiency Measurement (IGHEM)*, Linz, Austria, 2016,

[41] B. Baidar, "A numerical investigation of the winter-kennedy method with application to axial turbines," Ph.D. dissertation, Dep. of Engineering Science and Mathematics, Lulea University of Technology, Norrbotten, Switzerlad, 2020.

[42] B. Baidar, J. Nicolle, B. K. Gandhi, M. J. Cervantes," Sensitivity of the winter-kennedy method to inlet and runner blade angle change on a kaplan turbine," in *29th. IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems,* Kyoto, Japan, 2019, pp.022038 https://doi.org/10.1088/1755-1315/240/2/02203

[43] Baidar B, Nicolle J, Gandhi BK, Cervantes MJ. Numerical study of the winter–kennedy flow measurement method in transient flows. *Energies*, vol. 13, no. 6, pp. 1310, Mar. 2020, https://doi.org/10.3390/en13061310

[44] Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı (ETKB), "Dünya Bankası, Hatcd Ltd. Elektrik üretiminde enerji verimliliği, enerji sektör programı faz 2

projesi; Alpaslan-1 HES türbin performans test raporu, Proje No: H358793," Ankara, Türkiye, 2020.

[45] G. Özbek, S. Rüstemli, "Hidrolik türbin performans testlerinin yapılmasında boya seyreltme metodunun kullanılması-saha çalışması," *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* vol. 28, no. 3, pp. 973-992, Dec. 2023. https://doi.org/10.53433/yyufbed.1190992

[46] G. Özbek, S. Rüstemli, "Hidrolik türbin performans testlerinin yapılmasında winter-kennedy metodunun kullanılması-saha çalışması," Euroasia *Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Science*s vol. 9, no. 22, pp. 41-61, Aug. 2022. https://doi.org/10.5281/zenodo.6948331

[47] G. Özbek, "Hidroelektrik santrallerinde enerji verimliliğine türbinin etkisi," Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği ABD, Bitlis Eren Üniversitesi, Bitlis, Türkiye, 2022.

[48] O. Gezer, "Verim izleme sistemi kurulumu ve operasyonlar" presentedat the *EUAS IPA Training Program*, Ankara, Türkiye, Mar. 25-26, 2021.

Dicle University
Journal of Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/dumf
duje.dicle.edu.tr

Research Article

Intelligent Forecasting of Electric Energy Demand with Artificial Neural Networks

Mert Savaş SAVAR[1*], Mete Eminağaoğlu[2]

[1] Dicle University, Computer Engineering Department, mertssvar@gmail.com, Orcid No: 0009-0001-1724-4736
[2] Yaşar University, Computer Engineering Department, mete.eminagaoglu@yasar.edu.tr, Orcid No 0000-0003-2456-919X

ARTICLE INFO

Article history:

Received 31 December.2024
Received in revised form 21 May 2025
Accepted 18 June 2025
Available online 30 June 2025

Keywords:

RNN, Artificial Neural Networks, Deep Learning, Electric Energy Demand, Forecasting

DOI: 10.24012/dumf.1610576

* Corresponding author

ABSTRACT

Energy demand forecasting is critically important for the effective planning and management of energy production and distribution. Accurate demand forecasts in the energy sector can help reduce costs and enhance the reliability of energy supply. In this study, data-driven methods are employed to predict future energy demand. Multidimensional datasets, including historical consumption data, weather conditions, economic indicators, and demographic information are utilized in the forecasting process. To select the most appropriate model and improve prediction accuracy, various time series modeling techniques and artificial neural network algorithms are tested. The results demonstrate that the RNN-based deep learning model outperforms other methods, such as LSTM and CNN, in terms of forecasting accuracy. Particularly during periods of high variability, such as seasonal transitions, RNN models provide predictions that are more reliable by reducing the Mean Absolute Percentage Error (MAPE) to 9%. This study contributes to the literature by offering a comparative analysis of different forecasting approaches using real-world data. Furthermore, it presents a repeatable and adaptable forecasting framework for energy suppliers and decision-makers, delivering tangible benefits in resource planning and mitigating operational risks.

Introduction

In recent years, the rapid development of machine learning and deep learning techniques has offered a new perspective on energy demand forecasting. These techniques can potentially obtain more accurate and reliable predictions through their data analysis and modeling capabilities. A deep learning model called a recurrent neural network (RNN) stands out for its ability to capture dependencies and dynamics in time series data.

The objective of this study is to evaluate the effectiveness and accuracy of the RNN model in energy demand forecasting, comparing it with traditional forecasting methods. Additionally, by examining the impact of different parameters on the model's performance, the optimal configuration will be determined, providing a useful tool for energy demand management.

Energy demand forecasting is a valuable tool in energy management decision-making. Accurate forecasts contribute to ensuring energy supply security, reducing production costs, and optimizing resource use. However, factors such as seasonal fluctuations in demand, economic variations, and sudden weather changes make demand forecasting challenging.

Traditional methods for energy demand forecasting can become inadequate over time and fail to capture the complex dynamics of energy demand patterns. Traditional forecasting methods often rely on simple statistical models and may not fully capture the dynamics and dependencies in complex time series data. Therefore, their prediction accuracy and precision can diminish over time. Additionally, they may be limited in dealing with the variability and uncertainty in energy demand forecasting.

In this study, three different methods were compared to predict energy demand accurately. Each technique is evaluated based on its ability to capture distinct characteristics of the energy demand series. This study aims to determine the most suitable forecasting method in the energy sector by analyzing the strengths and weaknesses of different modeling approaches.

Energy demand forecasting is a fundamental element that supports strategic planning across all processes, from energy production to distribution. Accurate energy demand forecasting is crucial for planning production capacity, optimizing resource utilization, and managing costs effectively. Today, energy demand exhibits a complex structure influenced by numerous factors such as population

growth, economic development, seasonal changes, and climatic conditions [1].

Therefore, advanced modeling techniques that can learn from historical data and predict future possibilities are essential for accurate forecasts. Energy demand forecasting studies not only help to reduce uncertainties in the energy sector but also play a critical role in enhancing energy supply security and achieving sustainable development goals. This study aims to compare various methods to improve the accuracy of energy demand forecasts, contributing to better planning and management processes in the energy sector.

Machine learning and deep learning techniques offer a new perspective in energy demand forecasting through their data analysis and modeling capabilities [2]. Particularly, deep learning models like the recurrent neural network (RNN) model excel at capturing complexity and dependencies in time series data. Therefore, the effectiveness and accuracy of the RNN model in energy demand forecasting are evaluated and compared with traditional methods.

Our method allows us to make more precise and accurate predictions. Our method enables us to make energy demand forecasts more accurately. This helps energy companies and planners better understand future demands. Based on this information, energy companies can develop better strategies and improve decision-making processes.

In this context, the recurrent neural network (RNN) model has emerged as an effective method for energy demand forecasting. RNN is a deep learning algorithm that can capture complex relationships and trends in time series data. This model is trained using historical energy consumption data to predict future demand. The memory cells in RNN enable the preservation of long-term connections, allowing for meaningful evaluation of past data. This enables the model to forecast future demand changes more accurately. Due to its ability to make stronger predictions compared to other traditional methods, the RNN model has become a popular choice in the energy sector [3].

Energy demand forecasting is an analysis and modeling process conducted to predict future energy needs. These predictions are important for various sectors, such as energy producers, distribution companies, and energy-consuming industries. Energy demand forecasting utilizes statistical and machine learning techniques to estimate future energy demand using historical data. During this process, several factors, such as weather conditions, economic factors, seasonal variations, and demographic data, are taken into consideration [4]. Accurate energy demand forecasting helps in effectively managing energy resources and optimizing energy planning and production strategies. It also enables efficient resource utilization and cost reduction and stabilizes the energy supply. Energy demand forecasting is a process that requires data science and statistical analysis skills. Proper data collection, data cleaning, model selection, and validation processes enhance the reliability of these forecasts.

Literature Review

Artificial neural networks, particularly recurrent neural networks (RNN) and long short-term memory (LSTM) networks, are increasingly popular in energy demand forecasting due to their high accuracy in working with time series data. This literature review summarizes relevant studies, findings, and methods related to using RNN and LSTM models for energy demand forecasting.

Artificial Neural Networks (ANNs) provide effective results in energy demand forecasting and can integrate multiple influencing factors, such as weather conditions, socioeconomic data, and seasonal effects, into the model. Unlike traditional statistical methods, ANN-based methods can learn complex, nonlinear relationships, making them advantageous in energy demand forecasting [5].

Notably, RNN and LSTM models excel in predicting future demand based on historical data. Their main strength lies in capturing sequential dependencies within energy demand data and learning long-term relationships.

A. Energy Demand Forecasting with RNN Models

RNNs possess a recurrent structure that allows them to retain information from previous time steps, making them advantageous for energy demand forecasting, as demand typically exhibits sequential dependencies over time [6].

RNN-based forecasting models yield stable results, particularly in short-term demand predictions. However, classical RNN models can encounter issues like "gradient vanishing," which can limit the model's performance in learning long-term dependencies. Consequently, for long-term forecasting, advanced RNN models, such as LSTMs, are preferred.

Applications of RNN in Energy Demand are as follows:

- Short-term energy demand forecasting: RNN models are effective for hourly or daily energy demand predictions.
- Seasonal analysis: RNN can analyze seasonal energy demand data to predict future demand trends [7].

B. Energy Demand Forecasting with LSTM Models

LSTM networks, a variant of RNN, are particularly effective in modeling long-term dependencies, which are essential in energy demand forecasting. They excel in capturing trends, seasonal variations, and sudden fluctuations within energy demand data, learning more complex dependencies than RNNs.

The success of LSTM networks lies in their "cell state" structure, which allows them to store information and forget unnecessary data, optimizing the model. This feature makes LSTMs highly accurate and capable of long-term learning in energy demand forecasting [8].

Applications of LSTM in Energy Demand

- Long-term forecasting: LSTM models provide high performance in long-term forecasts, such as monthly or yearly energy demand predictions.

• Factor-based forecasting: LSTMs are highly effective at integrating multiple variables, such as weather data and economic indicators that influence energy demand.

C. Similar Studies in Energy Estimation

In his thesis study conducted at Bilecik Şeyh Edebali University, Özkay (2021) utilized hourly wind speed data from the Bilecik Meteorology Directorate [9]. A dataset of hourly measurements collected over 10 years was employed 67% of the data was reserved for training, while 33% was allocated for testing. A 3-layer LSTM model was used for prediction, and two types of LSTM were compared. The implementation of prediction models was carried out using Python software. While this study shares similarities with his thesis in terms of using the LSTM algorithm and Python software, it distinguishes itself by presenting other learning algorithms and utilizing different location data as input.

Görgel and Kavlak (2020) utilized a 1-year dataset from a wind farm in the Urla district of Izmir province, Türkiye. The dataset consists of wind power values measured at 10-minute intervals between 01.05.2017 and 31.05.2018. Three hundred instances were used for training, while the remainder was allocated for testing. Like this study, neural networks, LSTM, and GRU algorithms are employed in the prediction model. In the LSTM model, three hidden layers are used, and the process is repeated five times with 100 iterations each. Error rates were determined using the MAE absolute error method. This study differs from their research in its use of different location data as input [10].

Ceylan and Demirören have used regression and artificial neural network (ANN) methods for short-term load forecasting in the Gölbaşı region. In their study, they used maximum and minimum temperature values and days as input variables for the ANN model and power consumption values as the output [11].

Zhang and Wang (2019) applied recurrent neural networks (RNNs) for short-term energy demand forecasting in China. Their study demonstrated that RNN-based models significantly outperformed traditional methods like ARIMA and support vector machines (SVM). The authors highlighted the effectiveness of RNNs in capturing the complex time-dependent patterns in energy consumption data. Their results showed that RNNs could provide more accurate forecasts, especially during periods of peak energy demand, making them a promising tool for short-term energy prediction tasks. The research concluded that RNNs are highly suitable for modeling energy consumption data due to their ability to learn from sequential data without losing information over time [12].

Liu and Xu (2018) explored the integration of weather data with RNNs for short-term energy demand forecasting in urban areas. The study demonstrated that including external weather variables, such as temperature and humidity, improved the forecasting accuracy of the RNN model. The authors showed that energy consumption is closely tied to weather patterns, and by adjusting for these external factors, RNNs were able to produce more reliable predictions. This study underscored the potential of RNNs to handle not only the historical energy consumption data but also incorporate external factors that influence demand, which significantly enhanced the model's performance compared to traditional approaches [13].

In their 2020 study, Jebara and Ghorbel developed a hybrid model combining RNN and Long Short-Term Memory (LSTM) networks for energy demand forecasting. Their hybrid approach was found to be superior to both standalone RNN and LSTM models, as it was able to capture both short-term fluctuations and long-term trends in energy consumption. This study highlighted the strengths of combining the capabilities of both models, where RNN is effective in handling shorter sequences, and LSTM excels at capturing long-term dependencies. By combining these models, the authors were able to improve forecasting accuracy and provide more precise predictions of energy consumption [14].

Kim and Song (2016) compared RNNs with traditional time-series models, such as ARIMA and exponential smoothing, in the context of energy demand forecasting. Their study found that RNNs significantly outperformed traditional methods, especially in capturing non-linear trends and seasonality in energy consumption. The authors concluded that RNNs were more suitable for handling complex relationships in energy data and performed better in forecasting energy demand during peak periods. This comparison demonstrated that RNNs are a powerful tool for energy forecasting, offering greater flexibility and accuracy in modeling time-series data. [15].

Farahat used Artificial Neural Network (ANN) and Bayesian Model (BM) methods for long-term load forecasting in Egypt's industrial city. In the forecasting models, he employed year, temperature, and past load values as input variables and reused past load values as the output. The application aimed to predict the annual peak load and total load over a 24-month period. He stated that the error values obtained from the testing process were at reasonable levels. Using the model, five-year interval forecasts made up to the year 2020 [16].

Short-term hourly demand forecasting was performed in Turkey in a study conducted by Toker and Korkmaz in 2011. Electricity consumption data from 2008-2009 for Turkey and meteorological data for Istanbul were used. The monthly seasonality in the consumption data is separated using the spectrum analysis method. Two different forecasts made hourly day-ahead and one-week-ahead predictions. For the day-ahead forecast, the MAPE value was found to be %2 for the last five months of 2009, while for the one-week-ahead forecast, the MAPE value was found to be %4 [17].

In the thesis study at Osmaniye Korkut Ata University in 2023, a dataset consisting of measurement data from the Gökçedağ Wind Energy Plant located in the Bahçe district of Osmaniye province was utilized. Conducting data analysis, he divided the dataset into eight different data groups. Subsequently, he attempted to predict the power output of the wind turbine using Artificial Neural Networks

(ANN). Comparing the results, he determined the accuracy of the predictions using methods such as R-squared, Mean Absolute Error (MAE), and Root Mean Square Error (RMSE). The study stands out for using a dataset from a different location and not employing different models such as LSTM or GRU.

D. Methods Used

RNN (Recurrent Neural Network) and LSTM (Long Short-Term Memory) are models commonly used in time series analysis, including for predicting future values.

RNN is a type of neural network that is designed to process sequential data, such as time series data. Unlike traditional neural networks, RNN has a feedback loop that allows information to pass from previous steps to the current step. This enables the network to have a memory of past information while processing new inputs. RNNs are widely used in natural language processing, speech recognition, and, of course, time series analysis.

LSTM is a type of RNN that is specifically designed to overcome the "vanishing gradient" problem, which occurs when traditional RNNs have difficulty retaining long-term dependencies in the data. LSTM introduces a special memory cell that can retain information over extended periods. This allows the model to remember important patterns and relationships in the time series data, even when the time intervals between relevant events are large.

When applied to time series analysis, RNN and LSTM models are trained using historical data. The models learn from past patterns and relationships in the data and then use that knowledge to predict future values. These models can capture complex patterns and dependencies in the data, making them effective in capturing the temporal dynamics of time series.

To analyze the research topic, RNN and LSTM models can be used to predict future energy demand. By training the models with historical energy consumption data, they can learn the patterns and trends in the data and make accurate predictions for future demand. These models can take into account factors such as seasonality, trends, and other relevant variables to provide reliable forecasts.

Overall, RNN and LSTM models are powerful tools in time series analysis, particularly for predicting future values. They successfully applied in various domains, including finance, weather forecasting, and energy demand prediction.

Advantages of Artificial Intelligence in Energy Demand Forecasting

Artificial intelligence (AI) offers significant advantages in energy demand forecasting, including more accurate predictions, increased efficiency, and better decision-making in energy management. Here are some of the key advantages AI provides in energy demand forecasting

A. Increased Accuracy and Precision

AI, particularly through deep learning and machine learning models (such as RNN, LSTM, and CNN), can achieve high accuracy and precision in energy demand forecasting. Compared to traditional methods, AI models can analyze large datasets, recognize complex patterns, and make more precise predictions based on historical data.

B. Effective Performance with Time-Series Data

AI excels in handling time-series data, which is crucial in energy demand forecasting as energy consumption typically varies over time. AI models, such as RNNs, can accurately forecast energy demand by capturing complex temporal dependencies in the data, accounting for seasonal variations, daily differences, and factors like weekdays and weekends, leading to more reliable results.

C. Handling Big Data

The data used in energy demand forecasting is often large and complex, involving sensor data, weather conditions, energy production data, and user behavior. AI can process and analyze big data efficiently, making it capable of handling more data and complexity than traditional models. This allows AI models to extract valuable insights from diverse and voluminous data sources.

D. Adaptability

AI models have the ability to adapt to evolving and changing conditions in energy demand forecasting. For instance, energy demand can change based on factors such as temperature variations, holidays, and economic changes. AI algorithms can adjust to new data over time, improving prediction accuracy as new patterns emerge, making them well-suited for dynamic environments.

E. Real-Time Forecasting and Optimization

AI enables real-time energy demand forecasting, which is crucial for energy managers to monitor and manage energy consumption efficiently. AI models can provide continuous and accurate predictions based on real-time input data, facilitating better decision-making. Additionally, AI-based models can optimize energy systems, improving efficiency and reducing costs.

F. Integration of Multiple Factors

AI can integrate and account for multiple factors and variables simultaneously when forecasting energy demand. For example, weather data, historical energy consumption, economic indicators, and user behavior can be combined to make more comprehensive and accurate predictions. By considering these factors together, AI models provide a more complete view of energy demand.

G. Anomaly and Error Detection

AI can detect anomalies and errors in energy demand forecasts. This is especially beneficial for identifying discrepancies or system faults early on, allowing energy distributors to adjust their predictions and operations. By detecting these issues early, AI contributes to more reliable and accurate decision-making in energy distribution.

H. Cost Savings and Efficiency

The use of AI models leads to more effective and efficient solutions in energy distribution and consumption management, which can result in cost savings. Accurate energy demand forecasts allow for optimal production and distribution capacity, reducing unnecessary energy generation and transportation costs.

İ. Deep Analysis with Complex Models

AI can perform deep analysis through the use of complex models, which allows for a more detailed understanding of energy consumption patterns. Specifically, deep learning techniques can create sophisticated models that provide deeper insights into energy demand trends and fluctuations.

J. Decision Support Systems

AI helps energy managers make data-driven decisions, facilitating the development of more effective decision support systems. AI-powered forecasts assist in creating better planning, production, and distribution strategies, ultimately optimizing energy demand management.

Artificial intelligence offers significant advantages in energy demand forecasting by providing high accuracy, efficiency, and flexibility. The use of AI helps us better understand the dynamics of energy consumption, utilize resources more efficiently, and develop more sustainable energy solutions in the long term.

Data Analysis Methods

This study focuses on the implementation of several artificial neural network models, such as RNN, LSTM, and CNN, for energy demand prediction. Firstly, an accurate and up-to-date dataset was collected, and data preprocessing steps were performed. Subsequently, artificial neural network models were trained and optimized for energy demand predictions. The performance of the trained models was evaluated, and the results were presented. Depending on the scope and objectives of the research, further details and analysis are conducted [18].

Firstly, data collection was conducted to gather accurate and up-to-date data for energy demand prediction. The dataset should include factors that influence energy consumption and have sufficient historical data. Collaboration with energy providers, government institutions, or other sources may be necessary to obtain data on electricity consumption, weather conditions, seasonality, holidays, and other potential variables [19].

Secondly, data preprocessing is necessary to prepare the collected dataset for analysis. This step involves handling missing data, detecting and correcting outliers, and normalizing the data. Additionally, it is important to partition the dataset into training, validation, and test sets.

Thirdly, the RNN model is implemented on the dataset to train and predict energy demand. Determining the architecture of the model, tuning hyperactive parameters, and conducting the training process are essential in this step. Evaluation of the model's performance using criteria and metrics is also important.

Next, optimization of the model and error analysis were performed. Trying out different optimization techniques to improve the model's performance is necessary during the training process. Error analysis, where the model's predictions are compared with actual values, helps identify weaknesses of the model and enables improvements.

The results were evaluated by assessing the performance of the trained RNN model in predicting energy demand. Comparisons with actual data and other existing prediction methods were made to determine the success of the models.

A. Data Collection

Collect historical data on energy consumption for each store location over a specific period. Obtain weather data, including temperature, humidity, and precipitation, for the corresponding period. Additionally, gather data on store-specific factors such as operating hours, holidays, and promotions.

Clean the collected data by handling missing values, outliers, and inconsistencies. Normalize the data to bring them to a consistent scale. Split the dataset into training, validation, and test sets.

The data used in the study is the total amount of energy entering the region on an hourly basis from 2015-01-01 to 2023-10-17 in the Dicle Elektrik Dağıtım region. The Dicle Elektrik Dağıtım region includes the provinces of Şanlıurfa, Diyarbakır, Şırnak, Mardin, Batman, and Siirt. The total energy entering the Dicle Elektrik Dağıtım system is composed of several different data sources.

Out[6]:

Date	Tuketim(Mwh)	haftanin_gunu	gunler	ceyreklik	ay	yil	yilin_gunleri	ayin_gunleri	mevsim	yilin_haftalari
2015-01-01	57262.16	3	Thursday	1	1	2015	1	1	Kis	1
2015-01-02	56512.42	4	Friday	1	1	2015	2	2	Kis	1
2015-01-03	57612.95	5	Saturday	1	1	2015	3	3	Kis	1
2015-01-04	57431.43	6	Sunday	1	1	2015	4	4	Kis	1
2015-01-05	58533.53	0	Monday	1	1	2015	5	5	Kis	2
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
2023-10-13	41506.00	4	Friday	4	10	2023	286	13	Sonbahar	41
2023-10-14	40376.00	5	Saturday	4	10	2023	287	14	Sonbahar	41
2023-10-15	40676.00	6	Sunday	4	10	2023	288	15	Sonbahar	41
2023-10-16	37726.00	0	Monday	4	10	2023	289	16	Sonbahar	42
2023-10-17	37154.00	1	Tuesday	4	10	2023	290	17	Sonbahar	42

Figure 1. Data import table

The data was obtained from the DEDAS Energy Markets unit. During the observation period at the beginning of the pandemic in 2020, there was a dramatic decrease in the months of March, April, and May. Therefore, a correction coefficient was used to adjust the seasonal patterns of the data during these months. According to the observations, this correction of approximately 5% helped adjust the regular seasonal patterns.

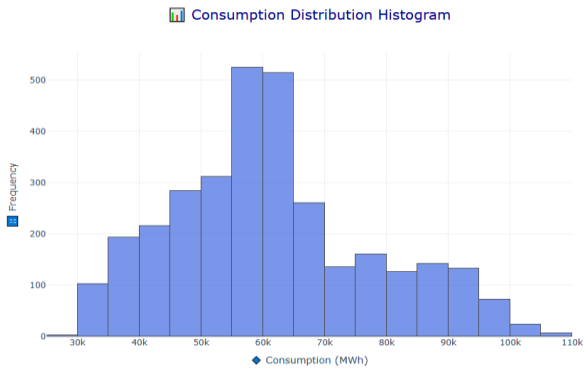


Figure 2. Demand (MWh) histogram

As seen in the histogram table of our data, it shows a normal distribution between 30k and 100k MWh. When examining the histogram graph for consumption quantities between 2015 and 2023 years, it was observed to follow a normal distribution. The data is concentrated between 55K and 65K, rarely exceeding 100K, and the lowest value is observed to be 30K.

In addition, weather data was extracted with Python from "open-meteo," an open-source site, and added to our main data.

B. Data Processing

Python programming language used for data preprocessing. Python was preferred due to its flexible structure, extensive library support, and continuous development as an open-source language. Data processing refers to the operations performed to make datasets suitable for analysis or use. These operations can include cleaning, transforming, merging, scaling, or feature extraction.

The hourly energy consumption data is converted into a daily-based system. Subsequently, variables such as weather, temperature, seasons, and wind conditions are calculated.

Date	Tuketim(Mwh)	haftanin_gunu	gunler	ceyreklik	ay	yil	yilin_gunleri	ayin_gunleri	mevsim	yilin_haftalari
2015-01-01	57262.16	3	Thursday	1	1	2015	1	1	Kis	1
2015-01-02	56512.42	4	Friday	1	1	2015	2	2	Kis	1
2015-01-03	57612.95	5	Saturday	1	1	2015	3	3	Kis	1
2015-01-04	57431.43	6	Sunday	1	1	2015	4	4	Kis	1
2015-01-05	58533.53	0	Monday	1	1	2015	5	5	Kis	2
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
2023-10-13	41506.00	4	Friday	4	10	2023	286	13	Sonbahar	41
2023-10-14	40376.00	5	Saturday	4	10	2023	287	14	Sonbahar	41
2023-10-15	40676.00	6	Sunday	4	10	2023	288	15	Sonbahar	41
2023-10-16	37726.00	0	Monday	4	10	2023	289	16	Sonbahar	42
2023-10-17	37154.00	1	Tuesday	4	10	2023	290	17	Sonbahar	42

Figure 3. Transposing daily data

Energy consumption is analyzed by categorizing it into specific periods of the year. In daily energy consumption data, seasonal, monthly, daily, and weekly patterns are also identified.

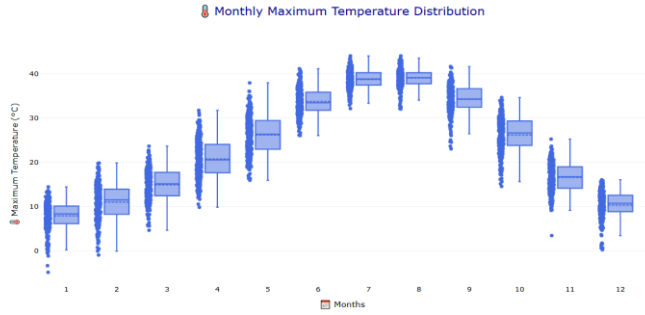


Figure 4. Historical features

In this graph, the temperature variation by month is examined. As seen in the graph, temperatures in the region increase during the summer months, exceeding 40 degrees. Some additional features to use in time series forecasting are generated. Features such as day of the week, season, days of the year, etc., were added to the data model [20].

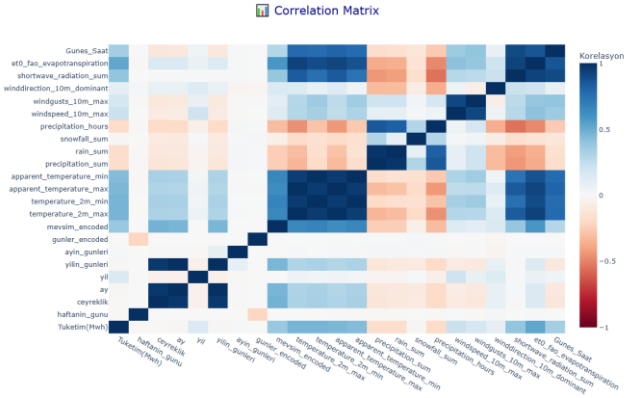


Figure 5. Weather data (Daily, 2015-2023)

In this graph, the correlation between the data examined. Accordingly, it is seen which variable the Consumption variable is related to. Additionally, the correlation between other variables was also identified [21].

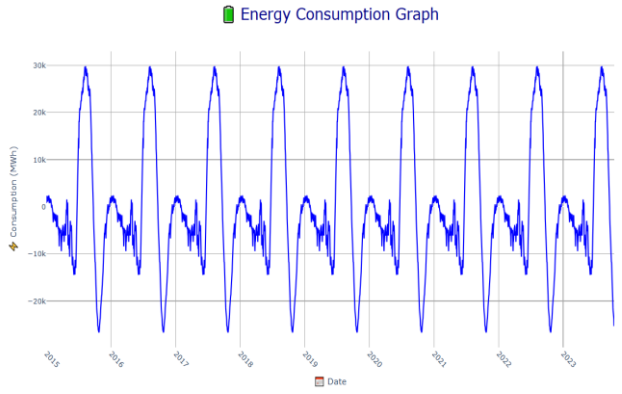


Figure 6. Variation of consumption data by year and month

In this graph, the correlation between the data examined. Accordingly, it is seen which variable the Consumption

variable is related to. Additionally, the correlation between other variables was also identified. Above, the correlation between model features was observed. According to this, the values with the highest correlation with Consumption are the hourly data. The next most important correlated features observed are evaporation, perceived temperature, season, and year variables. Variables with low correlation related to precipitation amount and conditions.

Additionally, the graph also depicts the correlation between variables. Naturally, there is close to a 99% correlation among hourly consumption. However, the correlation between precipitation and wind variables was observed to be low.

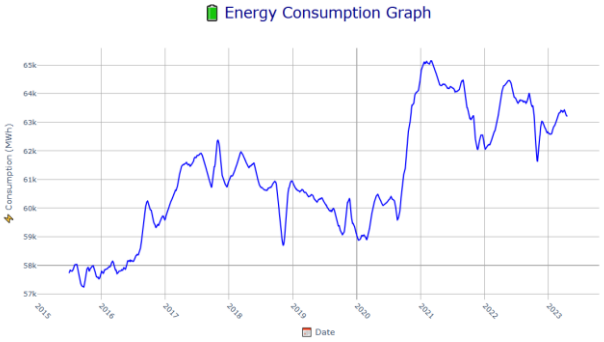


Figure 7. Trend chart

The other component is the trend. In this graph, the trend of the data has been isolated. Accordingly, it said that there has been an increasing trend over the years. What is crucial here is that the residual values are low because residuals contain values that cannot be modeled for the data. These values represent consumptions that occur unexpectedly, such as significant outages in a distribution area, disrupting the normal seasonality values. These values are reflected in the data as residuals.

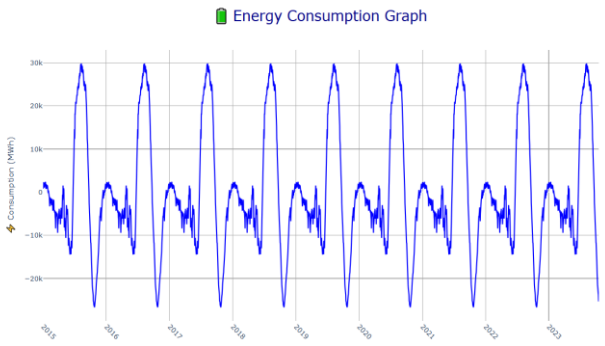


Figure 8. The consumption graph by season

When seasonal values were examined, it was observed that values up to 30 K were explained during periods of high consumption. Another component is the trend and the values remaining after the seasonality is removed from the data. These values show random increases and decreases. They consist of other factors affecting consumption.

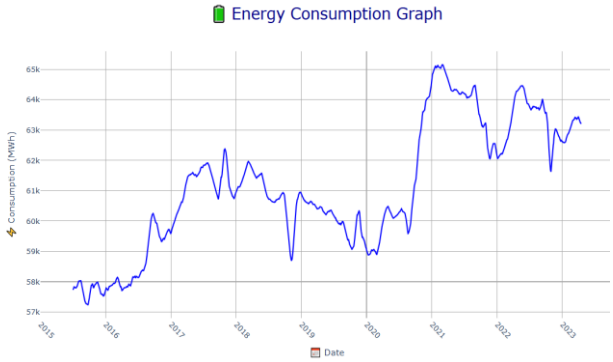


Figure 9. The consumption graph by years

An upward trend shift was observed in the trend data after the year 2021. This increase indicates the emergence of additional consumption points in the region.

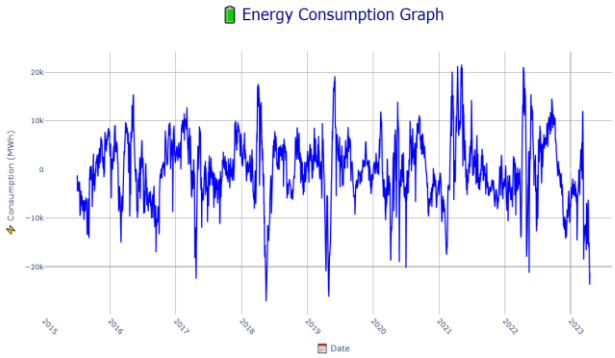


Figure 10. The consumption graph by trend

The fact that errors do not exhibit a trend in the graph and are randomly distributed around zero indicates that the component analysis of the model was correctly performed. Additionally, the residual values are important in showing unexplained consumption increases. According to the graph, unexplained consumption was observed in the range of +20 K to -20 K.

Model Selection

The model will be determined by testing several types of artificial neural networks. Model selection is based on the data structure, data quantity, and data complexity [22]. In this study, model selection will involve testing multiple models, and the model with the highest score after testing is chosen.

Making forward-looking predictions based on past values is quite challenging in terms of the complex relationships between inputs. In the study, predictions are made based on past values of energy consumption, which is difficult to predict accurately and foresee within certain limits. It is directly influenced by many other meteorological variables, such as wind direction, pressure, humidity, and light. For energy consumption prediction, machine-learning methods such as simple RNN, LSTM, and CNN Simple RNN models were used, and the performance of these models was

analyzed to examine their usability for energy consumption forecasting.

A. Simple RNN Model

Simple RNN (Recurrent Neural Network) is a model belonging to the family of recurrent neural networks (RNNs) and is particularly used in time series analysis, natural language processing, and other sequential data problems. Simple RNN has a cell structure and is known for its ability to use past information in making future predictions [23].

RNN is a type of artificial neural network that processes sequential data. Unlike traditional networks, it not only considers the current input but also relates it to past inputs, allowing the network to carry information across time.

RNN stores past information to be used in the next step, but it struggles to learn long-term dependencies, especially in time series data, where long-term dependencies are crucial.

Training Process:

- Forward Pass: RNNs learn the time dependencies of the data by taking the previous output of the data set as input at each step. This helps them understand long-term dependencies in sequences.
- Backpropagation Through Time (BPTT): The training process in RNNs is done using a method called "Backpropagation Through Time." This process involves comparing the network's output to calculate the error, and the error is propagated backward through time (at each time step).
- Vanishing Gradient Problem: In RNNs, as the number of time steps increases, problems such as vanishing gradients (where the gradients become very small) or exploding gradients (where the gradients become excessively large) can occur. To overcome these issues, advanced models like LSTM or GRU are preferred.

Simple RNN uses a loop to combine past information with current inputs to make future predictions. This structure represents the model's ability to understand temporal dependencies. The cell structure of a Simple RNN produces an output at each step by using the inputs received at that step and the output from the previous step.

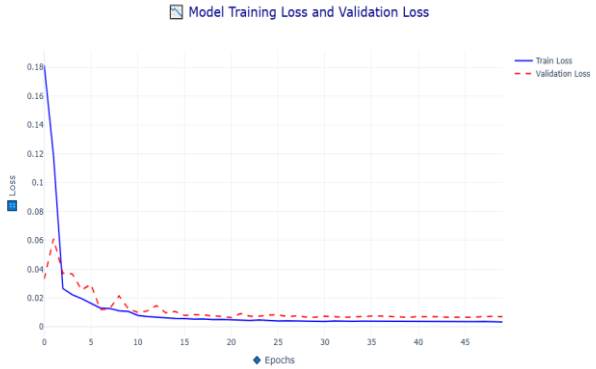


Figure 11. Validation loss and train loss for RNN

Validation performed for the model by examining the Loss values of the training and test data is shown in Figure 11. The train and test errors should be similar and show a decrease toward zero together.

Table 1. Performance scores of the simple RNN model

Metric Name	Value
MAPE	9.6008%
RMSE	7785.1538
R^2	0.8253

Figure 12 denotes the plots of the values predicted by the model alongside the actual values. It should be noted that the horizontal axis in Figure 12 denotes the time in terms of days, which is also true for Figure 15 and Figure 18. The dataset was made more manageable for prediction by normalized and appropriately framed modeled. Different numbers of epochs are applied during the implementation of each model in the prediction application. The Simple RNN model provided the most suitable result for 50 epochs. When higher epochs, such as 60 and 90, were applied, it was observed that there was not much change in the prediction values, but the runtime of the program significantly increased on the other hand, when fewer epochs, such as 10, 15 were applied, it was observed that deviations from the prediction increased.

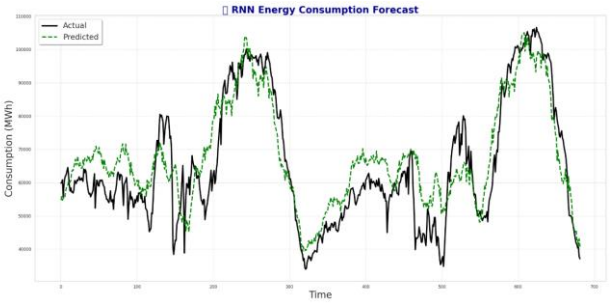


Figure 12. The comparative analysis of demands (actual versus predicted) obtained by RNN

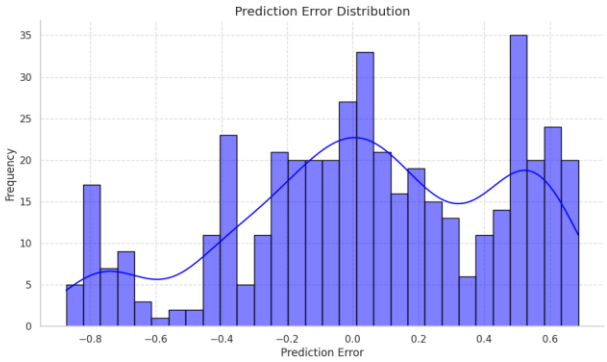


Figure 13. Histogram of the RNN time series forecast error distribution

This histogram shows the distribution of prediction errors from the model. The X-axis represents the magnitude of the prediction errors, while the Y-axis represents the frequency of those errors. The histogram bars indicate the range in which the model most frequently makes errors, while the KDE (Kernel Density Estimation) curve reveals the overall shape of the error distribution.

If the error distribution is symmetric and centered, it suggests that the model is making balanced predictions. However, if the errors tend to shift in one direction, it may indicate the presence of a systematic bias. This graph is an important visualization tool for analyzing the model's accuracy and identifying potential sources of error.

B. LSTM Model

In the traditional Recurrent Neural Network (RNN) method, the contribution of information decreases over time, making it challenging to learn from previous time steps in longer sequences. Consequently, the problem of gradient loss arises. When the gradient approaches zero, learning can slow down or even stop. This issue particularly occurs when it is necessary to evaluate information from many steps back to understand the input. To solve the vanishing gradient problem and facilitate learning complex patterns, the Long Short-Term Memory (LSTM) method is used. The LSTM method is a type of RNN commonly used for processing and predicting data sequences [24].

LSTM is a type of RNN designed to address the challenges RNN faces in learning long-term dependencies. LSTM incorporates mechanisms for forgetting, remembering, and updating information using a cell state.

Training Process:

- Special Structure: LSTMs are an improved version of RNNs. LSTM cells use "cell state" and "gates" to enhance the ability to learn long-term dependencies in time series data. This makes them much more successful, especially in learning long-term dependencies.
- Forget Gates and Memory: LSTMs work with forget gates, input gates, and output gates that control the flow of information. This allows unnecessary information to be forgotten and important information to be retained for a longer period.
- Backpropagation: LSTMs, like RNNs, use BPTT, but due to their structure, they operate in a more stable and efficient manner.

LSTM uses these gates to retain important information for longer periods and forget irrelevant information, making it more capable of learning long-term dependencies compared to traditional RNNs.

LSTMs have a unique design consisting of a memory cell and three gates: "Input, Forget, and Output." The memory cell allows the network to store information for extended periods, while the gates control the flow of information into, out of, and within the cell. The advantage of using these components is their ability to selectively remember and forget information, enabling them to maintain "long-term memory [25].

Figure 14. Validation and train loss obtained by the LSTM model

In Figure 14, validation is performed for the model by examining the Loss values of the training and test data. The train and test errors should be similar and show a decrease toward zero together. Figure 15 denotes the plot of the values predicted by the model alongside the actual values.

Table 2. Performance scores of the LSTM model

Metric Name	Value
MAPE	10.0414%
RMSE	8418.2729
R^2	0.7958

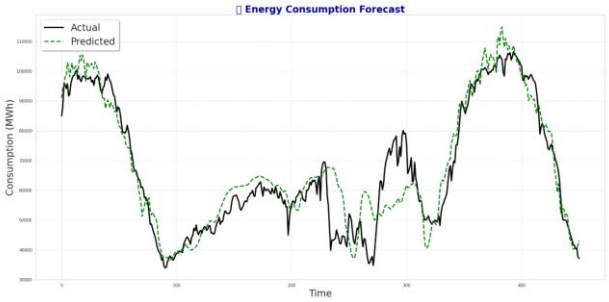


Figure 15. The comparative analysis of demands (actual versus predicted) obtained by LSTM

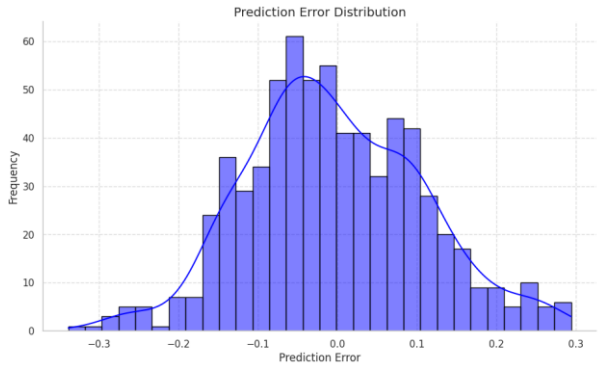


Figure 16. Histogram of the LSTM time series forecast error distribution

C. CNN Model

The CNN (Convolutional Neural Network) model is an effective forecasting tool for data with structural features such as time series data. This model can capture relationships in time series and compute long-term dependencies using convolutional networks (CNN). For a forecasting problem based on continuous and dynamic variables, such as energy consumption prediction, the CNN model is an effective choice. This model can process inputs from several different data sources (e.g., weather, seasons, and consumption data) and is used in determining energy demand [26].

Training Process:

- Filters and Feature Extraction: While CNNs are commonly used in image data, they are also suitable for time series data. CNNs work with convolutional layers that automatically extract features from the data. These features are used to help the model make better predictions.
- Max Pooling and Stride: During convolutional operations, techniques like "stride" and "max pooling" are used to reduce the data dimensions. This process speeds up the training and allows the model to learn more general features.
- Deeper Architectures: Deep CNNs learn the data at more complex levels and provide better generalization capabilities.

Figure. 17. Validation and train loss obtained by CNN model

Table 3. Performance scores of the CNN model

Metric Name	Value
MAPE	12.5120 %
RMSE	99.0515
R^2	0.7616

Figure 18 illustrates the representation of the values predicted by the model alongside the actual values.

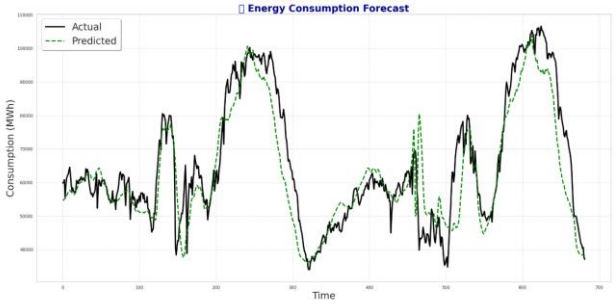


Figure 18. The comparative analysis of demands (actual versus predicted) obtained by CNN

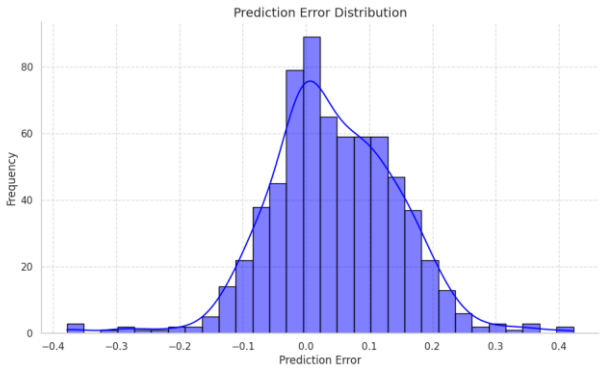


Figure 19. Histogram of the CNN time series forecast error distribution

D. Factors Affecting Performance

Data Attributes:

- Feature Selection: Properly chosen features can improve model accuracy. For example, including seasonal patterns or external factors can enhance time series prediction.
- Data Preprocessing: Proper scaling and handling of missing values are crucial. Inadequate or incorrect data preprocessing can negatively impact the model's performance.

Model Parameters:

- Hyperparameters: Learning rate, the number of layers, the number of neurons in each layer, and activation functions all directly affect the model's performance.
- Weight Initialization: The initialization of weights can either speed up or slow down the learning process.

Time Series Characteristics:

- Seasonality and Trends**:** If the time series data has seasonal fluctuations or long-term trends, the model needs to be configured to capture these features effectively.
- **Noise:** Noise in the data can affect the model's accuracy. Noisy data can cause overfitting if not handled properly.

Dataset Size and Time Steps:

- Amount of Data: The model needs to be trained with a sufficient amount of data. Training with too little data can lead to overfitting or underfitting.
- Time Steps: Focusing on shorter or longer time intervals may impact the model's performance.

Training Process:

- Overfitting and Underfitting: Overfitting or underfitting can significantly affect the accuracy of time series predictions. Regularization techniques like L2 regularization or dropout can help address these issues.

Model Depth and Complexity:

- Number of Layers: Deeper networks can learn more complex relationships, but they can also lead to higher computational costs and overfitting.
- Hidden Layers: More hidden layers allow the model to capture more complex features, but this can also increase training time.

E. RNN, LSTM, and CNN Comparison

The use of each model depends on the problem and the dataset. If your data contains long-term dependencies, LSTM may be the best solution. RNNs offer simple and fast solutions but are limited to complex datasets. CNNs, on the other hand, are particularly powerful when working with visual data and extracting local dependencies in time series data.

RNN and LSTM models can be used to predict future energy demand by training them with historical energy consumption data. These models can learn patterns and trends in the data and provide reliable forecasts by considering factors such as seasonality, trends, and other relevant variables. In time series analysis, RNN and LSTM models are particularly powerful tools for predicting future values.

They have been successfully applied in various fields, including finance, weather forecasting, and energy demand prediction.

Criterion	RNN (Recurrent Neural Network)	LSTM (Long Short-Term Memory)	CNN (Convolutional Neural Network)
Model Type	Recurrent neural network (for sequence data)	Advanced RNN (for learning long-term dependencies)	Convolutional neural network (primarily for image and time-series data)
Training Process	- Gradient propagation through time (BPTT)	- Gradient propagation through time with forget, input, and output gates (BPTT)	- Feature extraction with convolutional layers
Long-Term Dependencies	Weak (Vanishing Gradient Problem)	Strong (Learns long-term dependencies with cell states and gates)	Limited (Good for short-term dependencies in time-series data)
Hyperparameter Optimization	- Learning rate	- Learning rate	- Number of filters
	- Number of cells	- Number of cells	- Kernel size
	- Time steps	- Dropout	- Learning rate
		- Batch size	- Batch size
Error Analysis	- Difference between training and test error (Overfitting)	- Difference between training and test error (Overfitting)	- Difference between training and test error (Overfitting)
	- Vanishing Gradient	- Vanishing/Exploding Gradient	- Extracts features at different levels
Advantages	- Simple and fast to train	- Excellent at learning long-term dependencies	- Highly effective for image and time-series data
	- Suitable for sequence data	- Manages gradient problems better	- Extracts local features efficiently
Limitations	- Struggles to learn long-term dependencies	- More complex structure and computationally intensive	- Struggles to capture long-term dependencies in time-series data
	- Vanishing gradient problem	- Longer training times	
Recommended Use Cases	- Simple time series predictions	- Learning long-term dependencies in time-series prediction	- Image data analysis
	- Sentiment analysis	- Natural language processing	- Time-series data for convolutional feature extraction

Figure 20. Comparison of RNN, LSTM, and CNN architectures

Results

Three different deep neural network models, namely CNN, RNN, and LSTM, were developed for the prediction of active energy consumption. These models, particularly the

recurrent neural network-based architectures, are trained under the same conditions to enable a fair comparison of their performance. The findings were evaluated based on key performance metrics such as RMSE, MAPE, and R^2 [27-31].

Among these architectures, it was observed that the CNN model exhibited lower performance compared to the other neural networks. The performance of the CNN model fell below expectations; however, it is believed that its performance was enhanced through various updates. The results presented in Table 1 indicate that the performances of the architectures are close to each other, with the best performance achieved by the simple RNN model. The performance measures obtained for RNN are as follows: MAPE: 9.60%, RMSE: 7785, 15 and R^2: 0.825. These measures are considered satisfactory since the mean absolute percentage error is below 10% and the coefficient of determination (R^2) value is above 0.5.

Table 4. Performance measures of the models

Model	MAPE	RMSE	R^2
Simple RNN	9.60%	7785.15	0.82
LSTM	10.04%	8418.27	0.79
CNN	12.51%	9095.15	0.76

Table 5. Summary of the architecture and the parameters used in the models

Parameters	RNN	LSTM	CNN
Number of hidden layers	3	2	1
Number of units in a hidden layer	60,40,32	64,32	64
Batch size	10	20	9
Epochs	50	100	50
Learning rate	0.001	0.001	0.001
Optimizer	RMSProp	RMSProp	RMSProp

The regression graphs of actual data versus. Predicted data for the three artificial neural network models are given in Figure 12, Figure 15, and Figure 18, which are summarized in the previous section. When the predicted data is compared with the actual data in these figures, it is observed that all three models produced satisfactory results. To detect that the model performs better, prediction and actual data are graphically represented, where it is observed that the data points are quite close. Thus, it said that the predicted values approximate the actual values.

Conclusion

In this article, the application of Python and machine learning techniques in the field of energy consumption prediction is modeled using the dataset of energy consumption in the DEDAŞ region. Data analysis methods and data mining applications are employed to prepare the dataset for the model. For the implementation of the prediction model and time series analysis, machine learning methods such as Simple RNN, LSTM, and CNN are used. The best performance results were obtained by the simple RNN model. This prediction study in the energy sector demonstrates the feasibility of more predictable, more sustainable, and efficient energy production. When the model is set up and run, it is observed that after 50 epochs, the loss values for the model approach are zero. As seen, even 10 epochs are sufficient for this model.

In the modeling phase, machine-learning models such as simple RNN, LSTM, and CNN are applied. Through data analysis, missing and incorrect (nonsensical) values in the dataset are filled with average values to ensure more accurate predictions, making the data more orderly. In the analysis of outliers, many column values were found to have values far outside the range of meaningful values, negatively affecting the results. These values are adjusted to appropriate boundary values. While using machine-learning methods, those suitable and applicable to this study were identified.

When the model stages (epochs) were applied with 50 stages in the Simple RNN model, 19 stages in the LSTM model, and six stages in the CNN model, the most efficient results were obtained. By maintaining the same model framework and only applying different models of Simple RNN, LSTM, and CNN, the results were observed. It noted that there were changes in the number of parameters when different models were applied.

Energy demand forecasting is a process of analyzing and modeling to predict future energy requirements. These forecasts are crucial for sectors like energy producers, distribution companies, and industries that consume energy. The forecasting process uses statistical and machine learning methods to estimate future energy needs based on historical data. Various factors, including weather conditions, economic influences, seasonal fluctuations, and demographic information, are considered in this analysis. Accurate forecasting helps in managing energy resources effectively, optimizing planning and production strategies, and improving the efficiency of resource utilization. It also leads to cost savings and ensures a stable energy supply. Energy demand forecasting requires expertise in data science and statistical analysis. Proper data collection, cleaning, model selection, and validation are essential for ensuring the reliability of these predictions.

This study focuses on using artificial neural network-based models for energy demand forecasting. Energy demand prediction is crucial for energy companies and consumers, as accurate forecasts play a significant role in resource planning and energy efficiency. In this study, the simple RNN model is employed to predict future demands by utilizing historical energy consumption data. The results obtained demonstrate the effectiveness of the RNN model in energy demand forecasting.

This study provides a valuable contribution to the planning and decision-making processes in the energy sector. Additionally, it enables more accurate predictions of future

energy demand, thereby offering benefits in terms of energy efficiency and resource management.

Ethics Committee Approval and Conflict of Interest Statement

Ethics committee approval is not required for the prepared article. There is no conflict of interest with any person or institution in the prepared article.

References

[1] Ülkü, H., & Yalpır, Ş. (2021). Enerji talep tahmini için metodoloji geliştirme: 2030 yılı Türkiye örneği. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10(1), 188-201. https://doi.org/10.28948/ngumuh.814134

[2] Tekinay, Ç. (2022). Türkiye'nin günlük rüzgâr enerjisi üretiminin derin öğrenme ile modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Istatistik Ana Bilim Dalı, Ankara.

[3] Y. Berus ve Y. Benteşen Yakut, "derin öğrenme (1d-cnn, rnn, lstm, bilstm) ile enerji tüketim tahmini: diyarbakır avm örneği", DÜMF MD, c. 15, sy. 2, ss. 311–322, 2024, doi: 10.24012/dumf.1415055.

[4] Bulut, M., & Başoğlu, B. (2017). Kısa dönem elektrik talep tahminleri için yapay sinir ağları ve uzman sistemler tabanlı hibrid tahmin sistemi geliştirilmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi,32(2). https://doi.org/10.17341/gazimmfd.322184.

[5] Saglam, M., Spataru, C., & Karaman, O. A. (2022). Electricity demand forecasting with use of artificial intelligence: The Case of Gokceada Island. Energies, 15(16), 5950. https://doi.org/10.3390/en15165950.

[6] Yurdoğlu, H. (2023). Bir tekstil fabrikasının elektrik tüketim değerlerinin derin öğrenme ile tahminlenmesi [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. Pamukkale Üniversitesi.

[7] G. Öztürk and O. Eldoğan, "Prediction of Multivariate Chaotic Time Series using GRU, LSTM and RNN", SAUCIS, vol. 7, no. 2, pp. 156–172, 2024, doi: 10.35377/saucis...1404116.

[8] Balcı, F., & Oralhan, Z. (2020). LSTM ile EEG Tabanlı Kimliklendirme Sistemi Tasarımı. Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi135-141. https://doi.org/10.31590/ejosat.779526.

[9] Özkay, Berkay. (2021). Derin öğrenme kullanılarak Bilecik ili rüzgar hızı tahmini. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik.

[10] P. Görgel ve E. Kavlak, "Uzun Kısa Süreli Hafıza ve Evrişimsel Sinir Ağları ile Rüzgar Enerjisi Üretim Tahmini", DÜMF MD, c. 11, sy. 1, ss. 69–80, 2020, doi: 10.24012/dumf.596533.

[11] Ceylan, G., Demirören, A., 2004, Yapay Sinir Ağları ile GölbaĢı Bölgesini Kısa Dönem Yük Tahmini, ELECO"2004, Bursa.

[12] Zhang, Y., & Wang, J. (2019). Energy demand prediction using recurrent neural network: A case study in China. Energy, 184, 98-110.

[13] Liu, C., & Xu, Q. (2018). Short-term energy demand forecasting using weather-adjusted recurrent neural networks. Renewable Energy, 123, 568-578.

[14] Jebara, A., & Ghorbel, M. (2020). A hybrid model for energy demand forecasting using RNN and LSTM. Journal of Energy Engineering, 146(5), 04020083.

[15] Kim, J., & Song, M. (2016). Comparison of recurrent neural networks and traditional time-series models for energy demand forecasting. Energy Conversion and Management, 109, 19-26.

[16] Farahat, M. A., 2004, Long-Term Industrial Load Forecasting And Planning Using Neural Networks Technique And Fuzzy Inference Method, IEEE, Universities Power Engineering Conference, Upec 2004 39th International, pp. 368-372.

[17] Toker, A.C. ve Korkmaz, O., 2011, Türkiye'nin kısa süreli elektrik talebinin saatlik olarak tahmin edilmesi, 17.Uluslararası Enerji ve Çevre Konferansı, İstanbul, 32-35.

[18] Tosun, M. F., & Şentürk, A. (2023). Kasislerin Yakıt Tüketimine Etkisinin RNN, LSTM, GRU Tekrarlayan Derin Öğrenme Algoritmaları ile Tespiti. Journal of Intelligent Systems: Theory and Applications, 6(1), 12-23. https://doi.org/10.38016/jista.1141359.

[19] Haliloğlu, E., Y., Tutu, B., E. / Journal of Yasar University, 2018, 13/51, 243-255.

[20] Alkan, Ö., Öztürk, A., & Tosun, S. (2018). Rüzgar ve güneş santrallerinde kisa dönem enerji üretim tahmini için matematiksel modellerin oluşturulmasi. Duzce University Journal of Science and Technology, 6(1), 188-195. https://doi.org/10.29130/dubited.359698.

[21] Işıkdemir, Y. E., & Akal, F. (2024). Attention Based Energy Demand Forecasting in Smart Grid Environments. Firat University Journal of Experimental and Computational Engineering, 3(3), 227-240. https://doi.org/10.62520/fujece.1423120.

[22] Es, H., Kalender, F. Y., & Hamzaçebi, C. (2014). yapay sinir ağlari ile türkiye net enerji talep tahmini. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 29(3). https://doi.org/10.17341/gummfd.41725.

[23] Çelebi, S. B., & Fidan, Ş. (2024). RNN-Based Time Series Analysis for Wind Turbine Energy Forecasting. International Journal of Engineering and Innovative Research, 6(1), 15-28. https://doi.org/10.47933/ijeir.1387314.

[24] Sezen, B., & Yüce, N. (2022). Amerika Havayolu Yolcu Milinin LSTM ve AR Modeli Kullanılarak

Tahmini. Journal of Turkish Operations Management, 6(2), 1345-1360. https://doi.org/10.56554/jtom.1036107.

[25] G. Akkuzukaya ve M. Yıldız, "Time Series Anomaly Detection Embedded Systems By Using LSTM", IJMSIT, c. 7, sy. 2, ss. 90–96, 2023.

[26] Utku, A., & Akyol, S. (2024). Rüzgâr Hızı Tahminine Yönelik Hibrit ConvLSTM Modeli: Hindistan'ın En Yüksek Rüzgâr Hızına Sahip Şehirleri İçin Bir Vaka Çalışması. Mus Alparslan University Journal of Science, 12(2), 201-215. https://doi.org/10.18586/msufbd.1561443.

[27] Kaysal, K., Akarslan, E., & Hocaoğlu, F. O. (2022). Türkiye kısa dönem elektrik yük talep tahmininde makine öğrenmesi yöntemlerinin karşılaştırılması. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 9(2), 693-702. https://doi.org/10.35193/bseufbd.1004827.

[28] Çakmak, E., & Selvi, İ. H. (2022). Derin Öğrenme (CNN, RNN, LSTM, GRU) Kullanarak Protein İkincil Yapı Tahmini. Acta Infologica, 6(1), 43-52. https://doi.org/10.26650/acin.1008075.

[29] Babiker Abdalla Ibrahim, A., & Altun, K. (2024). LSTM Deep Learning Techniques for Wind Power Generation Forecasting. Journal of Soft Computing and Artificial Intelligence, 5(1), 41-47. https://doi.org/10.55195/jscai.1471257.

[30] American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS) (2016) Volume 25, No 1, pp 192-208.

[31] Aslan, Y., Yaşar, C., & Nalbant, A. (2006). Electrical peak load forecasting in kütahya with artificial neural networks. Journal of Science and Technology of Dumlupınar University (011), 63-74.

Dicle University
Journal of Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/dumf
duje.dicle.edu.tr

Research Article

Multiple classification of brain tumor images using a new and efficient convolutional neural network-based model

Aynur Sevinç[1*], Buket Kaya[2], Mehmet Gül[3]

[1] Dicle University, Silvan Vocational School, Department of Computer Technologies, aynur.sevinc@dicle.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1388-2554
[2] Firat University, Department of Electronics and Automation, bkaya@firat.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9505-181X
[3] Sirnak University, Department of Computer Engineering, mgul@sirnak.edu.tr, ORCID: 0000-0002-4819-4743

ARTICLE INFO

Article history:

Received 17 January 2025
Received in revised form 16 February 2025
Accepted 21 March 2025
Available online 30 June 2025

Keywords:

Brain tumor, classification, convolutional neural network, deep learning, image processing

DOI: 10.24012/dumf.1622271

* Corresponding author

ABSTRACT

In conventional methods, the detection of tumour disease from brain images using magnetic resonance imaging is a difficult and human error-prone field of study that requires an expert medical doctor. Incomplete or inaccurate detection of brain tumours can have significant undesirable consequences such as shortening of human life. In order to overcome these difficulties, many researchers are working on autonomous disease detection supported by artificial intelligence. The aim of this study is to utilise brain magnetic resonance images with deep learning architectures for fast and reliable autonomous cancer detection. In this study, brain images are classified using two different datasets and a convolutional neural network infrastructure, which are widely used in the publicly available literature. The results obtained as a result of experiments with similar parameters in training, validation and testing processes are compared in detail with other studies in the literature and the differences between them are presented. The new convolutional neural network-based model proposed in the study achieved 99.76% classification result in the accuracy evaluation metric. The results obtained showed that the model proposed in the study can be used with high accuracy in brain tumour detection and can shed light on other fields of study.

Introduction

Anomalies in cell growth within the human brain or spinal canal result in the formation of brain tumors. These tumors pose significant challenges and are among the most formidable and lethal irregularities to address, impacting individuals across all age groups and genders. Swift identification of brain tumors is imperative to impede their progression to advanced stages. These growths can be classified as either non-cancerous (benign) or cancerous (malignant), with symptoms varying based on their size and cerebral placement. Glioma brain tumors are acknowledged as the most fatal type. The survival rate for high-grade gliomas is less than 5% over a span of five years [1]. Brain tumors rank among the ten leading factors contributing to mortality in both males and females. Additionally, they stand as the second primary contributor to cancer-induced fatalities in individuals under 20 years old, following leukemia. According to data from the year 2020, approximately 251.329 individuals across the globe lost their lives due to malignant brain tumors [2]. Some common symptoms of brain tumors include headaches, seizures, vision and hearing problems, difficulty understanding speech and language, mood or personality changes [3].

The manual evaluation of brain tumors on raw MR images is an extremely challenging task for radiologists. To overcome this situation, computer-aided diagnosis (CADx) is required to assist in the evaluation of MR images. In medical image analysis, many researchers have carried out different studies in this field. These studies can be classified as identification, detection and segmentation [4]. These studies are mainly carried out with traditional machine learning approaches and DL approaches belonging to the artificial intelligence (AI) class.

In addition to providing solutions to engineering problems that can be modeled as various systems, AI also helps to produce solutions to human-related problems, which are the most complex of systems. A very large part of these solutions is undoubtedly medical applications. Today, AI is utilized in almost every field of medicine. Detection of many types of cancer (lung, breast, central nervous system tumors, etc.), hypertension control during anesthesia, and calculating the volume and depth of brain tissues in MR images are examples of these applications. As a result, accurately assessing the size, shape and location of the tumor within brain tissue is an extremely difficult process. This also negatively affects treatment planning procedures. In medical science, any disease that may occur in soft brain

tissue is one of the most feared diseases. Detection of such tumors in the brain tissue, which serves as a vital organ for the individual, is of vital importance. This has led to the Brain Tumor Segmentation (BraTS) Challenge competition organized annually by Medical Image Computing and Computer-Assisted Interventions [5, 6]. The BraTS competition is specifically focused on the segmentation of tumor regions on MR images and is a competition that encourages studies in this field.

DL, a rapidly expanding domain within the realm of data science, pertains to a category of algorithms founded on artificial neural networks designed to handle unstructured data types like audio, images, videos, and textual content [7]. Its capacity to facilitate scalable interpretation of images makes DL adept at extracting intricate feature representations beyond human perceptibility. This, combined with the significance of managing extensive datasets to attain efficient and precise outcomes, introduces remarkable avenues for its application in the healthcare sector. One notable application is the utilization of deep learning for analyzing images, specifically in pinpointing tumor locations. DL serves a multitude of purposes, spanning from diagnostics and prognostics to real-time monitoring of analyses and the formulation of individualized treatment strategies. These possibilities unfold through the utilization of data collected and processed by deep learning models tailored for image analysis [8].

Recently, many studies have utilized CNN-based algorithms to classify brain tumors. Among these studies, the deep learning-based CNN model utilized to classify brain MR images into different classes stands out [9]. On the other hand, studies with extremely high accuracy rates were conducted with the use of net technologies such as AlexNet, GoogLeNet, etc. [10]. With evolving hardware and software infrastructure, CNNs will continue to play an important role for future academic research and industrial applications [11]. In this study on tumor detection and classification focusing on DL-based methods, we provide clinicians with a comprehensive overview of how to make accurate inferences from complex, heterogeneous and high-dimensional biomedical data.

Contribution

There is a good similarity in appearance between normal tissue and brain tumor cells, so segmentation of tumor sites becomes a challenging task. This may affect the appropriate medical treatment of the patient. Therefore, there is a necessity for a highly accurate automatic tumor detection and classification method. Deep ML-based methods allow this process to be performed faster and in a controlled manner with a low error rate. At this point, it is thought that the experimental results of the current study based on DL approaches provide significant contributions to support medical decision-making.

A review of the literature reveals that there are many studies on tumor segmentation, but fewer on tumor detection and classification. In this context, we propose a new and efficient CNN model from scratch for tumor detection and classification. Enhancing the creation of computer-assisted systems aimed at facilitating timely and precise brain tumor diagnosis holds pivotal significance in the realm of treatment procedures. Equally crucial is the refinement of previously suggested techniques to elevate the accuracy of medical image analysis, thereby expediting the process of accurate diagnosis and subsequent treatment. At this point, our model, which we built from scratch, significantly increases the classification accuracy compared to previous studies.

The consistent utilization of automatic classification methods employing ML and AI has consistently yielded superior accuracy when compared to manual classification. Thus, putting forth a system that undertakes detection and classification via DL algorithms like Convolutional Neural Networks (CNN), Artificial Neural Networks (ANN), and Transfer Learning (TL) holds the potential to make substantial contributions to medical professionals engaged in this domain.

The primary contributions of the present research can be succinctly outlined as follows:

- The study facilitates the creation of a novel and efficient CNN model right from its inception, utilizing the principles of deep learning.
- The study demonstrates experimental results obtained through datasets with high accuracy in identifying brain tumors.
- The developed system is one of the studies that achieved the best classification accuracy among all other related studies.
- The proposed model will help clinicians predict the type of tumor and provide the most suitable treatment for patients.

The subsequent segments of the study are organized in the following manner: In Section 2, the conceptual framework underlying brain tumor detection and classification is expounded, along with a comprehensive survey of the preexisting literature in this domain. Proceeding to Section 3, the study delineates the dataset and methodological approach employed, elaborating on the designed DL model for brain tumor detection. In Section 4, the experimental outcomes and associated observations are presented. Concluding the study, the final section encapsulates overarching concluding observations and engages in a discourse concerning the future trajectories of DL-driven image analysis within the domain of cancer research.

Brain tumor and classification

The word tumor is a synonym for "neoplasm", which is the result of the abnormal growth of cells. A "neoplasm" is an abnormal tissue that is capable of unlimited growth and movement beyond the control of the living organism. Brain tumors, which manifest as a prevalent and aggressive ailment, manifest as an accumulation of these anomalous cells within the cerebral region. Typically, their emergence is prompted by an abrupt and atypical augmentation of

brain matter. The volume of these deviant cells is not static; instead, they undergo rapid proliferation and initiate dissemination [12]. A brain tumor can be malignant or benign depending on its morphological structure [13]. Benign tumors are less aggressive in terms of their normal appearance, with slow growth rates and regular borders, and can be surgically removed because they have good borders. Malignant tumors, on the other hand, contain cancer cells and can worsen the patient's condition as they rapidly spread to other tissues in the brain, have a very irregular shape and are aggressive to the point of being life-threatening. Furthermore, brain tumors are divided into primary and secondary tumors depending on their origin. Tumors that occur in the brain are considered primary tumors, while tumor types that arise in another part of the body and then progress to the brain are considered secondary tumors [14]. The approach to medical treatment predominantly relies on the specific types of tumors and their respective locations. Brain tumors can be divided into various groups according to their morphological structure, localization, growth rate and recently especially their genetic structure [15]. Figure 1 presents this grouping.

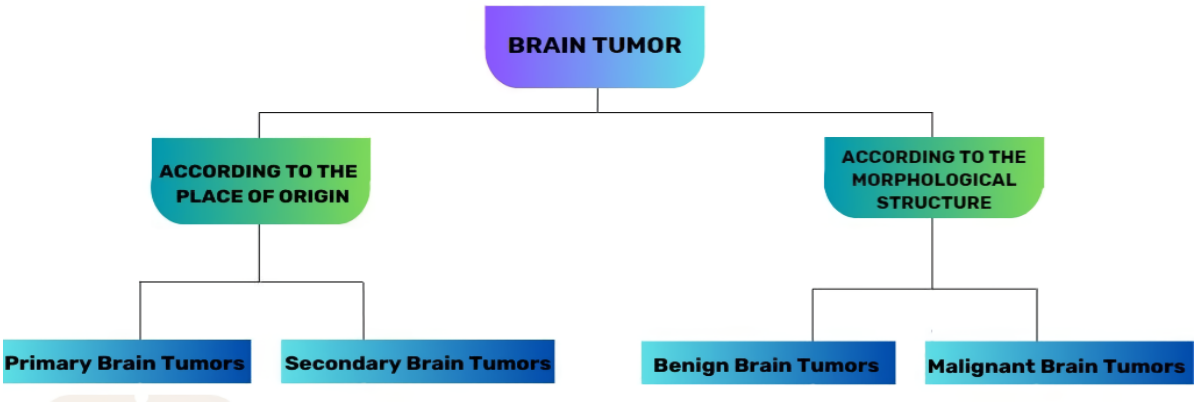


Figure 1. Brain tumor grouping

In 2016, the World Health Organization (WHO) released a revised edition of its brain tumor classification framework, encompassing significant revisions. The WHO introduced a classification into four distinct grades for malignant tumors, which considers both the physical and chemical attributes of the brain tumor. These grading criteria are visually represented in Figure 2.

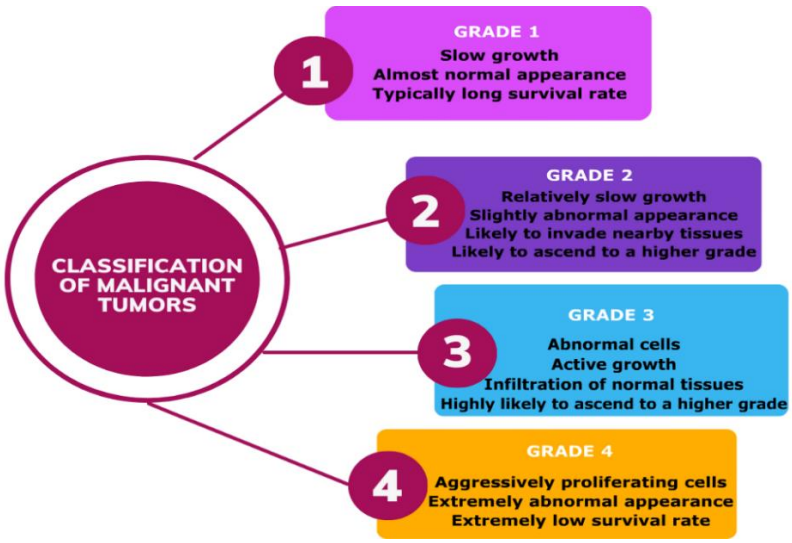


Figure 2. Brain tumor grading criteria

As can be seen in Figure 2, for the first time, the WHO classification of brain tumors is not based solely on histology. As a novelty, a "layered diagnosis" approach has been introduced to brain tumor classification. Within the revised 2016 WHO classification system for Central Nervous System (CNS) tumors, specific tumor types are delineated through a fusion of morphological, microscopic, molecular, and genetic considerations, while certain others persist in being characterized solely by their morphology. It is evident that the prevailing tendency favoring augmented integration of molecular and genetic components in tumor characterization, encompassing both CNS tumors and broader tumor classification, is likely to persist [16].

As per the National Brain Tumor Society, the spectrum of brain tumors encompasses over 120 distinct types. Within our study, we focused on Glioma, Meningioma, and Pituitary brain tumors, as these are the most frequently referenced categories in the literature. To provide a succinct overview, Glioma denotes a tumor category that originates within the brain and spinal cord, developing from glial cells that function as the brain's support structure. Gliomas encompass various subtypes, with the most prevalent being astrocytoma. Gliomas account for approximately 30% of all brain tumors and tend to be largely malignant [17]. Conversely, meningioma stands as one of the prevailing brain tumor types. Characterized by gradual growth, these tumors do not metastasize and are amenable to surgical removal. They are typically benign and do not adhere to brain tissue. This makes it possible to remove them completely with surgery. Meningiomas smaller than 2 cm or up to 5 cm in size can be encountered [18]. Pituitary tumors are benign tumors of the pituitary glands located in the lower part of the brain (skull base). They can be treated with medical and surgical methods. They often present with visual disturbances, hormonal disorders and headaches.

Causes and most common symptoms of brain tumor

Although the causes of brain tumors are unknown, it is accepted that some brain tumors are inherited. Moreover, there are some risk factors. These risk factors are briefly explained below [19]:

Gender: Brain tumors are more common in men, but meningiomas are more common in women.

Race: All types of brain tumors are more common in Caucasians.

Age: When the incidence of brain tumors is evaluated based on age, the incidence of tumors is higher in individuals over the age of 70, and in childhood, brain tumors in the cerebellum are more common in those under the age of 10.

Family History: Individuals with a family history of brain glioma are more likely to develop brain tumors. Apart from these, some viruses, radiation exposure, some chemical azo dyes, head trauma and various hormones can be counted as other risk factors in the formation of brain tumors.

The most common symptoms of brain tumors can be listed as follows:

-Headache (especially headache at night)
-Numbness, tingling or loss of strength in the arms and legs
-Gait and balance disorders
-Double vision, blurred vision, nausea, vomiting
-Fainting (epileptic seizures)
-Personality disorders, forgetfulness, speech disorders

Artificial intelligence and deep learning in brain tumor detection

Artificial intelligence (AI), which was developed based on the problem “How can machines be smarter?”, can be briefly defined as the ability of machines to imitate human cognitive and learning abilities and to realize human-specific reasoning abilities. For the first time in a 1985 study, artificial intelligence was used in brain tumor detection [20]. The frequency of brain tumors and the use of various sub-branches of AI in tumor detection and classification bring AI to an important point in the field of health informatics. These main sub-branches are shown in Figure 3.

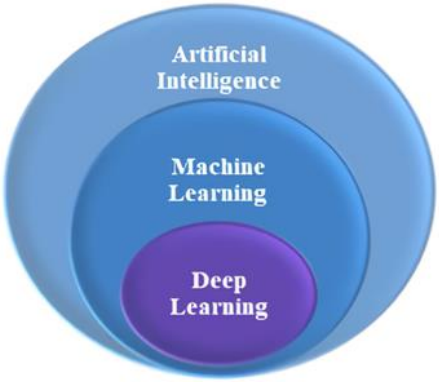


Figure 3. Artificial intelligence elements

DL is a machine learning approach that utilizes artificial neural networks (ANN), consisting of three or more layers [21]. ANN stand as a prominent technique within the domain of machine learning [22]. DL architectures have garnered preference over conventional Machine Learning (ML) algorithms due to their capacity for autonomous learning and adeptness in deciphering intricate image attributes. The landscape of DL continuously evolves with the emergence of novel models aimed at enhancing feature extraction, and finding utility across diverse medical domains. DL techniques encompass an array of methodologies extensively applied in tasks encompassing image processing, classification, and segmentation [23]. In building deep learning frameworks, three primary architectures are commonly employed: Convolutional Neural Network (CNN), Deep Belief Network (DBN), and Recurrent Neural Network (RNN). DBN finds utility in general classification tasks, while RNN is suited for sequential data formats. However, CNN holds sway in the domain of image, text, and audio classification [24].

Convolutional neural networks (CNN)

CNN constitutes a multi-layered, forward-propagating artificial neural network, notably employed in the realm of image analysis [25]. CNNs hold significance in image recognition and contribute substantially to the formulation and advancement of classification models rooted in natural language processing. CNN architecture has provided high success in diagnosing diseases in the fields of medicine, image and voice recognition, computer vision, text and video processing, and many other fields. The aim of artificial systems with CNN, which is based on the human visual system, is to perceive, identify and classify objects. Convolutional Neural Networks are a combination of the well-known convolution process and artificial neural networks.

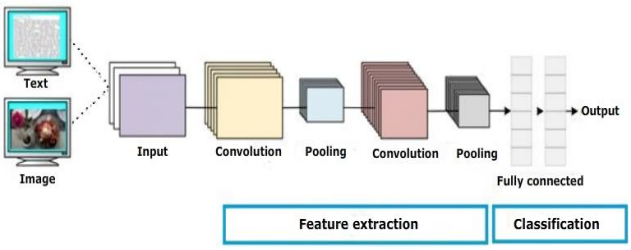


Figure 4. Convolutional neural network model

Upon scrutinizing the CNN architecture depicted in Figure 4, the model encompasses distinct components such as an input layer, convolution layers, pooling layers, a fully connected layer, and an output layer. Adhering to the conventional CNN structure as illustrated in Figure 4, each convolutional layer is succeeded by a rectified linear unit (ReLU), representing a nonlinear function, and subsequently, a pooling layer.

Related studies

Upon analyzing the literature, it becomes evident that numerous investigations rooted in deep learning have yielded promising experimental outcomes in the realms of diagnosing, classifying, and segmenting brain tumors. Of notable significance is the consensus that sophisticated deep CNN architectures have achieved impressive levels of automated brain tumor detection and accurate classification. Within this segment, the focus turns to a comprehensive review and presentation of recent studies centered around the deep learning methodology for brain tumor detection and classification.

Kumar, Prasad, and Metan [26] introduced a study focused on brain tumor detection and classification, where they proposed a model utilizing a Deep Convolutional Neural Network with a ResNet 152 Transfer Learning strategy. Their approach amalgamated CNN and Transfer Learning techniques. The research reported achieving remarkable accuracy along with a minimal error rate in tumor detection. In a separate endeavor, Bhanothu, Kamalakannan, and Rajamanickam [27] devised a swifter R-CNN deep learning algorithm for tumor detection. The algorithm employed the VGG-16 architecture as the foundational layer for both the region proposal network and the classifier network. The algorithm achieved an average precision of 77.60% across all classes. Çınar and Yıldırım [28] used CNN and ResNet50 architecture, which is a variant of CNN models. Their approach involved removing the last five layers of the ResNet50 model and then adding eight new layers. Vankdothu, Hameed and Fatima [29] proposed the combination of a CNN and Long-Short Term Memory (LSTM) in their work. The model's efficacy was tested against a Kaggle dataset comprising 3264 MR images, yielding a commendable accuracy of 92%. Conversely, Patil and Kirange [30] introduced a shallow Convolutional Neural Network (SCNN) and combined it with the VGG-16 network utilizing T1C modality MR images. Aslan [31] conducted a brain tumor detection study founded on deep learning principles. They employed the k-nearest neighbor (k-NN) algorithm in conjunction with the MobileNetV2 deep network model to identify brain tumors from MR images. The method garnered an accuracy rate of 96.44% in k-NN-based brain tumor detection. Deepak and Ameer [32] engaged deep CNN features in tandem with the transfer learning approach to classify brain tumors. Their study targeted a three-class classification problem, aiming to differentiate the major brain tumor types (glioma, meningioma, and pituitary). Nazir et al. [33] use a customized CNN model powered by three advanced explainable artificial intelligence (XAI) techniques. The proposed model achieved a remarkable training accuracy of 100% and validation accuracy of 98.67%. Goceri [34] designed an efficient network containing CNN and transformer blocks for glioma grading and brain tumor classification from MRIs. The proposed approach achieved a high accuracy of 99.21% in glioma grading and 98.66% in brain tumor classification.

Material and Method

This section describes the datasets utilized in the study and the preprocessing steps applied to the datasets. Then, detailed information about the proposed CNN architecture is given. We also discuss the reasons for choosing this method and the post-processing steps for training the model. The first dataset is the base dataset of our study. The second dataset is utilized while measuring the performance of the developed model when trained on a different dataset. Detailed information about the datasets is presented below.

Dataset-1

The brain tumor MR images processed in the current study were retrieved from the Kaggle web platform, which provides input for the use of metrics and ML algorithms for exploratory analysis. The dataset-1 is divided into two folders, the training folder and the test folder, containing a total of 7023 images [35]. 5712 data were allocated for training (81.3%) and 1311 for testing (18.7%) (Figure 6).

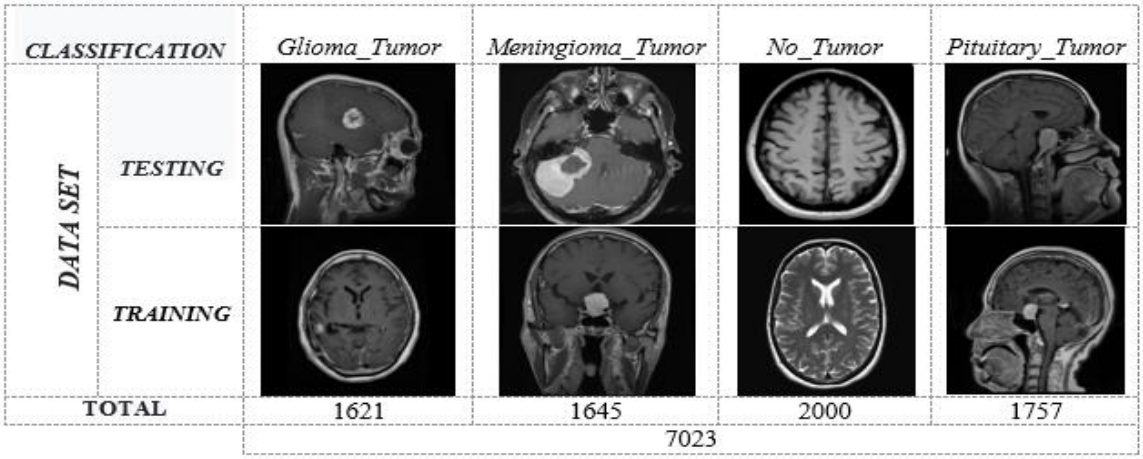


Figure 5. Examples of images and numbers of dataset 1

In Figure 5, 1621 images contain glioma tumors, 1645 images contain meningioma tumors, 2000 images contain no tumor and 1757 images contain pituitary tumors.

Dataset-2

Dataset 2 was downloaded for free from the Kaggle web platform, which provides publicly available data for scientific studies. The dataset-2 contains 3264 images in total [36]. 2870 images are reserved for training and 394 images are reserved for testing. Each folder has four subfolders (Glioma_tumor, meningioma_tumor, no_tumor, pituitary_tumor). These folders have MRIs of the respective tumor classes. A cross-section of the dataset is presented in Figure 7.

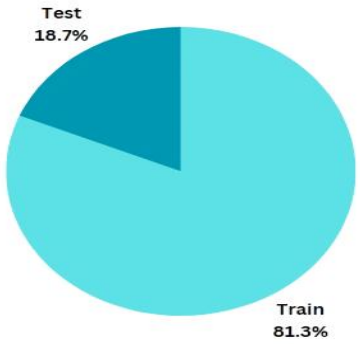


Figure 6. The distribution ratio of dataset 1

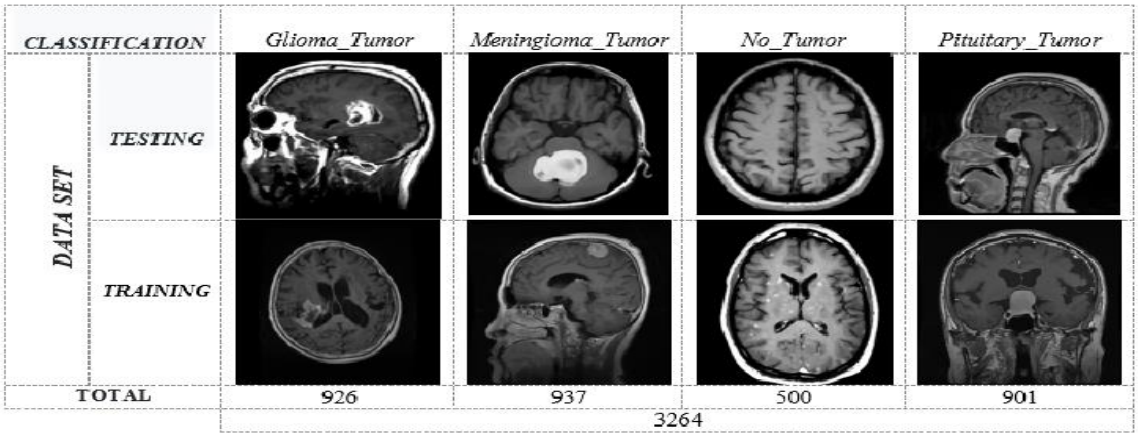


Figure 7. Examples of images and numbers of dataset 2

All images in the dataset are in two folders containing training and test images. To work with the data, the dataset was divided into glioma, meningioma, pituitary and no tumor folders. From the data divided into training and testing, 926 images contain glioma tumors, 937 images

contain meningioma tumors, 500 images contain no tumor and 901 images contain pituitary tumors.

Pre-processing

Data quality is crucial to ensure that the study is free from incorrect analytical results and wrong business decisions. In this case, preprocessing is a necessary step to improve data quality. In particular, since it is difficult to classify images with complex texture structures such as the brain, it is imperative to have a certain level of image quality. For these reasons, images should be preprocessed before training. The images used in this study have undergone preprocessing such as normalization, some cropping and resizing to remove noise and improve image quality. These steps are briefly described below.

Normalization, image cropping and resizing

The different head size of each person makes the analysis difficult. To overcome this problem, a normalization process was performed to place the images on the same coordinate plane (Figure 8). In the normalization steps, OpenCV and Python were used to find the extreme north, south, east and west (x, y) coordinates along a contour.

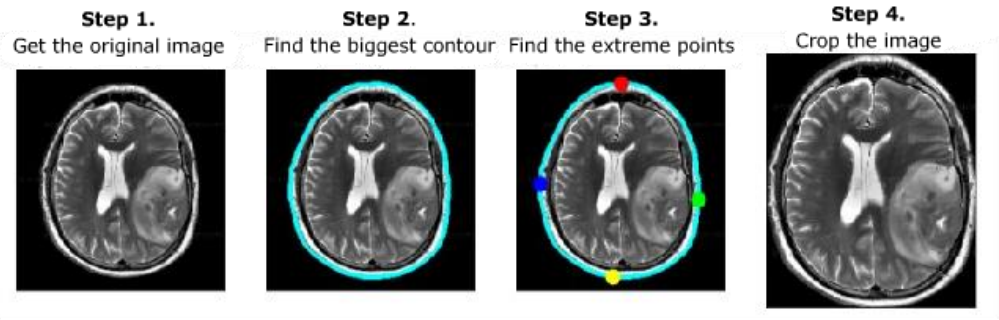


Figure 8. Normalization steps

In the next step, the images were resized to 224x224 pixels and the necessary preprocessing for CNN model input was applied (Figure 9).

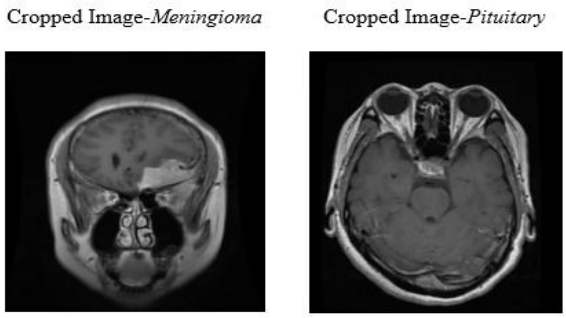


Figure 9. Examples of cropped and resized images in 224x224 pixels

In Figure 9, unnecessary and distorted areas as well as unnecessary backgrounds were removed from the images and the necessary processing steps were performed for the performance of the model and accurate classifications of images. To achieve this, the images were cropped and resized. Thus, the model is focused only on the regions where the features are present.

Proposed methodology

The deep learning architecture proposed for this study includes a Convolutional Neural Network (CNN). CNN is the most commonly used classifier as it produces remarkably successful results in the detection and classification of brain tumors. The study involves brain tumor diagnosis using MRI, classification as identification of type and tumor location. In this study, instead of using a separate model for each classification task, experiments were conducted using one model to classify brain images in different classification tasks. A new efficient CNN-based multi-task classification system built from scratch is developed for tumor detection and classification.

A thorough examination of the existing literature reveals a prevalent trend of conducting classification studies centered around the utilization of CNN architectures integrated with transfer learning models for the purpose of brain tumor detection. Although the use of this approach in classification studies offers different advantages, it may result in overfitting and inaccurate results. Given the feasibility of conducting brain tumor studies with modest datasets that do not necessitate an extensive array of class categories, the development of simpler CNN architectures proves adequate. In specific instances, research indicates the prevalence of two-class studies, such as distinguishing between tumor and non-tumor cases. To avoid over-learning and overfitting, we focused on training our model with more data and developing an efficient classical CNN network architecture. Figure 10 presents a diagram of the proposed model.

In our study, we undertook the task of enhancing the fundamental CNN model, culminating in the creation of an improved iteration. A new CNN model for brain tumor classification was crafted entirely from scratch. Our custom-designed model, stemming from modifications to the pre-existing CNN architecture, encompasses a total of 11 layers spanning from input to output layers. Within this structure, nine convolutional layers are interwoven with two fully connected layers. To facilitate training and evaluation, a dataset comprising 7023 brain MR images, sourced from the Kaggle platform, was employed—a dataset known for driving metrics and ML algorithms.

Figure 10. The architecture of the proposed CNN model

Central to CNN is the pivotal convolutional layer responsible for feature detection within images. It plays a fundamental role by executing convolution on input data. This process employs filters to scrutinize images, extracting both low-level and high-level features. Our novel CNN model commences with a convolutional layer featuring 64 filters, each possessing a filter size of 3×3. Subsequent to each convolutional layer, a pooling layer is introduced to mitigate network disparities. Among various pooling techniques, maximum pooling holds prominence due to its popularity. This technique trims down input data dimensionality while preserving critical information without compromising its integrity.

The utilization of normalization layers aids in refining the convolutional neural network's stability and regularity. Batch normalization, specifically, furnishes the advantage of expediting network learning while reducing data loss between processing layers by normalizing inputs. This enhancement significantly elevates accuracy across the network's expanse.

Recognizing the diverse array of features present in images and aiming to enhance the model's efficiency, adjustments were made to the number of filters in the third, fifth, seventh, and ninth layers. By augmenting the filter count, the network is equipped to better discern distinct image attributes. Following a similar methodology, these layers underwent the same sequence of operations: convolution, maximum pooling, and batch normalization. The outcome of these operations, in matrix form, necessitates flattening to facilitate utilization in the Fully Connected (FC) layer. To achieve this, a flattening layer was introduced, rendering the input ready for the FC layer.

Within our CNN neural network model, the FC layer follows the flattening layer. This layer garners its name from its comprehensive connection to all fields of the preceding layer, ultimately serving as the CNN architecture's terminal layer. To our model, we appended a 3×3 dimensional fully connected layer, endowed with 1024 filters. A dropout layer was then integrated to combat overfitting during model training. This layer operates by randomly deactivating certain neuron sets throughout the training phase. Post-experimentation, the optimal dropout value of 0.25 was determined based on model performance assessment.

Following the dropout layer, an additional fully connected layer with 3×3 dimensions and 512 features was incorporated. Ultimately, the model culminates in the final layer where the Softmax function is employed to generate class predictions based on the provided inputs, enabling multiple classifications. At this juncture, input data is classified into categories such as glioma, meningioma, pituitary, and non-tumor cases.

Table 1. Hyper-parameter used in the model

Hyper-parameter	Value
Input activation function	ReLU
Output activation function	Softmax
Loss	Categorical Cross-Entropy
Metrics	Accuracy
Optimizer	Adam
Epoch	60
Dropout rate	0.25
Initial learning rate	0.001
Learning rate decay	0.0001
Batch size	32
Train-test split	81.3%-18.7%

We ran our code in two different environments, first in the Python editor and then in the Google Colab platform, where we present our experimental results. Effective training of deep learning models requires careful selection of parameters and methods that optimize the accuracy and speed of the model [37]. In this study, all parameters were tested with different data partitions and tuned for optimal performance. The hyperparameters used in the model and their values are detailed in Table 1.

In this study, the determination of which layers to be used and which sections to be placed in the creation phase of the model, the hyper-parameters used and the parameters of the model were determined by examining successful methods in the literature and conducting experiments. Moreover, at this point, based on our experience, certain improvements have been made and optimum performance has been tried to be achieved. Adam optimizer was chosen as the optimizer of our model.

Taking into account the diverse factors influencing the efficacy of model training, the selection of an optimal number of epochs is paramount. An inappropriate epoch count may lead to memorization rather than genuine learning, and suboptimal updates to model weights. In our model, we determined the optimal epoch count as 60. To manage the training process, we employed categorical_crossentropy as the chosen loss function, coupled with an initial learning rate of 0.001.

The ReLU activation function was adopted for the input layer of our model, facilitating rapid learning. Conversely, the Softmax activation function was deployed for the output layer. Softmax operates by generating values within the 0-1 range, thereby ascertaining the probability of input membership in a particular class. A batch size of 32 was stipulated for training iterations. To gauge model performance, the accuracy metric was adopted—a well-recognized evaluation criterion within the literature. Furthermore, a pivotal parameter within our model is the dataset split: 81.3% of the available dataset was allocated for training, while the remaining 18.7% was reserved for testing purposes. This partitioning scheme plays a crucial role in the model's ability to generalize its learnings. The total number of parameters in the proposed CNN model is shown in Table 2 below.

Table 2. Total number of parameters in the proposed CNN model

Total parameters
Total params: 52.773.828 (201.32 MB)
Trainable params: 52.767.940 (201.29 MB)
Non-trainable params: 5.888 (23.00 KB)

As the number of parameters increases, the capacity of the model also increases, meaning it can learn more patterns. However, if the number of parameters is too high, the model can over-fit the training data and over-learn. In this case, it can perform poorly on the test data. Some techniques can be applied to the model to prevent over-learning. Examples of these techniques are regularization, dropout and data augmentation techniques.

In our study, we took some precautions to provide low time cost and high performance. When we look at the total number of parameters presented in Table 2, we see that the total number of parameters of our model is 52.77 million. 52 million parameters indicate a large capacity. At this point, risks such as over-learning may arise. We used the dropout technique to overcome this situation. This layer works by randomly disabling certain neuron clusters during the training phase. After the experiment, we determined the optimum dropout value as 0.25 according to the model performance evaluation. Since there were enough images in our dataset, we did not use the data augmentation technique. We aimed to reduce the time cost by running our model on a high-end computer system and observed its effect. We used Callback to speed up the training process of our CNN model and make it more efficient. In this context, we used early stopping to ensure time efficiency and prevent the model from being trained for unnecessary periods.

Almost all parameters in our model are trainable (52.76M). All layers of the model are open to learning. There are also 5.8K untrainable parameters in our model. These usually come from layers like Batch Normalization. This ratio is low, meaning almost all of the model is updatable.

When we compare the number of parameters of our model with some other popular CNN architectures; our proposed architecture has a total of 52.77 million parameters and a size of 201.32 MB, while VGG-16 architecture has 138 million parameters and a size of 528 MB. This architecture is quite large, time-consuming, and has many more parameters than our proposed model. In addition, ResNet50 architecture can be trained more deeply and is more efficient thanks to residual connections. In addition, EfficientNet-B0 is one of the popular CNN architectures that can work with fewer parameters such as 5.3 million and offer the same accuracy.

Our model has 52.77 million parameters, which is larger than ResNet50 but not as heavy as VGG16. This shows that our proposed model has high learning capacity and a strong architecture to capture complex patterns. A deep and wide architecture has the potential to learn complex visual features. Having more parameters compared to ResNet50 means that the model can learn more details. If trained with sufficient data, it can achieve high accuracy rates and show strong performance in challenging tasks. The high capacity of our model has become more efficient because it is well optimized. With some improvements, both the computational cost of the model has been reduced and the accuracy level has been increased. For example, the model has been made more balanced with techniques such as Dropout or Batch Normalization and Callback. In short, the good optimization of the training process has provided a strong model with high accuracy. The large capacity and deep structure of our model offers a powerful and flexible CNN architecture.

Results and Discussion

Within this section, we unveil the outcomes garnered from our experiments involving algorithms geared toward brain tumor detection and classification within MR images. Subsequently, we subject our proposed approach to a comprehensive evaluation utilizing suitable metrics. This evaluation culminates in a comparative analysis of the model's performance. Our novel CNN model, conceived as part of the proposed methodology, operates autonomously to detect and classify varying brain tumor types within the provided input dataset.

Evaluation metrics

The selection of appropriate metrics stands as a crucial stride in gauging the effectiveness and proficiency of the devised models. In this study, we employ established metrics such as accuracy, precision, recall, and F1 score to comprehensively assess the overall performance of our proposed model. These metrics are widely acknowledged and embraced in classification studies. The metrics used in the study are briefly explained below.

-*Accuracy:* Accuracy is a pivotal measure frequently employed to assess model performance. It represents the proportion of correctly classified samples, expressed as a percentage. The accuracy calculation, a paramount metric evaluating model adequacy, is articulated in Equation 1 below:

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

- *Precision:* Precision quantifies the proportion of positively predicted values that are indeed positive. The calculation of precision is outlined in Equation 2 below:

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

- *Recall (Sensitivity):* Recall elucidates how proficiently the model identifies positive cases among the instances that should have been predicted as positive. The calculation for the recall is defined in Equation 3 below:

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

- *F1 Score:* The F1 score represents the harmonic mean of precision and recall. It offers a consolidated measure of the test's accuracy. The F1 score calculation is presented in Equation 4 below:

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

Experimental results

Our study proposes a deep efficient CNN network that classifies the MR images in the dataset. These classes are meningioma, glioma, pituitary and no tumor. Firstly, all libraries required to perform the experimental phases were imported and experiments were performed.

Tumor types were classified with the CNN model built from scratch. The proposed model was validated by considering multiple stages and experiments. The proposed system provided high classification accuracy. The performance of the model was also analyzed via other metrics to determine the robustness of the system. The performance values obtained in our model are presented in Table 3 below.

Table 3. Performance metrics of the proposed CNN model based on Dataset-1

Tumor class	Precision	Recall	F1-score	Avg accuracy %
Glioma	0.99	1.00	1.00	99.76
Meningioma	1.00	0.99	1.00	
Pituitary	1.00	1.00	1.00	
No tumor	1.00	1.00	1.00	

The performance values in Table 3 are analyzed with the confusion matrix. In the following sections of the study, the confusion matrix created with actual values and predicted values is presented. All performance metrics of our study contain consistently high values. The accuracy value, which measures the adequacy of our model, was found to be 99.76%.

In the next step of our study, we trained our model with dataset-2 to measure the performance success of the system we developed. The model trained with a dataset of 3264 images with four classes provided high success. The classification success of the model with this dataset is 97.45%. This rate is another result that demonstrates that the model is robust and effective. It is also clear that our model performs quite satisfactorily in different experiments (Table 4).

Table 4. Performance accuracy values in different datasets

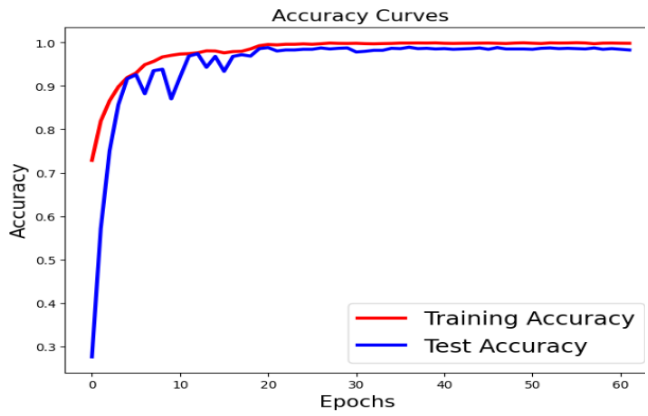
Dataset	Method	Accuracy %
Dataset-1	Proposed model-CNN	99.76
Dataset-2	Proposed model-CNN	97.45

Validating the model's robustness and generalization capability

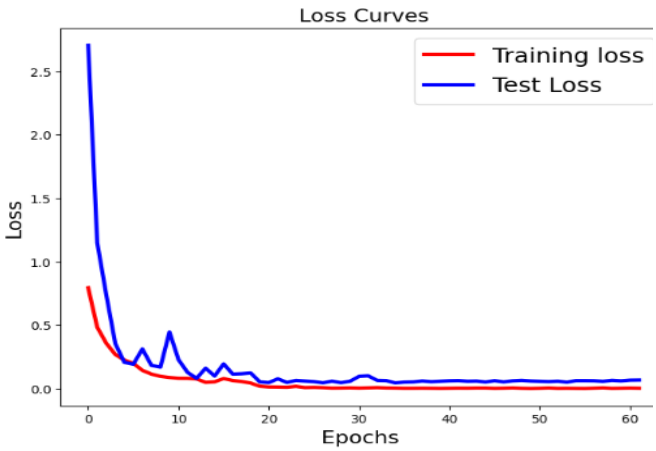
The generalizability of the model is one of the prerequisites for the model to be effective. To verify the generalization capability of our model that we built from scratch, the training and testing phases of two separate datasets were tested with different split ratios (9:1, 8:2, 7:3). We observed that splitting the training and dataset with different split ratios did not change the performance much. Moreover, the same dataset was trained with special CNN networks created with different numbers of layers and the

results were analyzed. In the experimental results of the model, the highest performance values were obtained and presented in this study. Different classification functions were also tested. In classical CNN-based models, Softmax and sigmoid functions are the activation functions used in classification. Additionally, ML classifiers (Support Vector Machine, Decision Trees, Naïve Bayes et al.) In our study, K-NN, which uses the number of nearest neighbors and distance measure, was selected as one of the machine learning classifiers and we found the accuracy of K-NN in deep CNN features to be 98.21%. As a result of the experiments, it was determined that Softmax provided the best performance among other classifiers in multiclass classification.

Selecting the most suitable hyper-parameters and testing them is one of the important steps for building a robust model. The CNN model proposed in this study was finalized after many methods were tried. Figure 11 demonstrate the training/testing accuracy and training/testing loss graphs of the new CNN neural network model for 60 epochs.



(a) Training and testing accuracy curve



(b) Training and testing loss curve

Figure 11. Training and testing curves

The horizontal axis demonstrates the number of iterations and the vertical axis demonstrates the learning rate (Figure 11). By examining the learning curves demonstrating the step-by-step learning process of the model, it can be determined whether the model demonstrates an overfitting situation. Additionally, the compatibility between the data set and the model can also be interpreted through these curves. Considering Figure 11 (a), both the test and training accuracy curves demonstrate an increasing slope as the number of iterations increases. After a certain number of iterations, there is a very small change in the accuracy value, which increases up to a certain epoch. Accordingly, it can be stated that the training of the model takes place at this stage.

The loss curve depicted in Figure 11 (b) illustrates a steady decline in the error rate. Upon closer examination, the graph reveals a well-performing CNN model during the training process, signifying favorable learning dynamics of the network over epochs. With each iteration, the loss value diminishes, and the accuracy rate surges as the model learns from the provided training dataset. As showcased in Figure 11 (b), it's noteworthy that the loss value stabilizes after a certain number of epochs, indicative of the convergence of the training process. Moving on to Figure 12, it presents the confusion matrix of the deep CNN network model, revealing its proficiency with high accuracy. The confusion matrix encapsulates valuable insights into the model's predictive prowess across different classes.

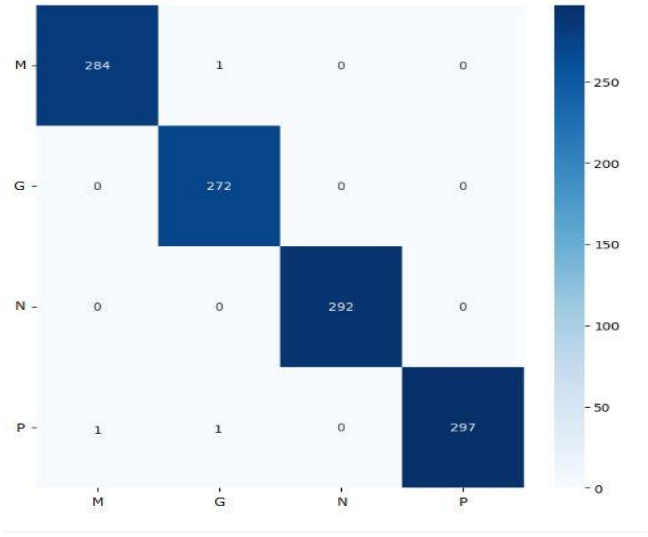


Figure 12. Confusion matrix of the model

In evaluating the performance of our brain tumor classification system, the confusion matrix serves as a pivotal tool. This matrix encapsulates a comprehensive summary of both accurate and erroneous classifications, presented in a structured table format. In our context, the abbreviations M, G, N, and P correspond to Meningioma, Glioma, No-Tumor, and Pituitary tumor, respectively, as depicted in Figure 12. A meticulous scrutiny of this matrix is imperative for a thorough assessment of the model's

capabilities. Upon reviewing the confusion matrix pertaining to our proposed model, it becomes evident that out of the 285 Meningioma brain tumor images earmarked for testing, a striking 284 are accurately predicted by the model. This level of precision underscores the proficiency of the model in identifying Meningioma cases. However, out of 274 Glioma tumor images, 272 images were correctly classified as Glioma. According to the confusion matrix, images without tumors were classified as no tumors with high accuracy. Similarly, images belonging to the Pituitary tumor type are also classified with high accuracy.

Differences of our proposed model from canonical CNN architectures

Our proposed model is designed with optimized layer order, advanced convolution techniques and modern normalization methods, unlike traditional canonical CNN structures. These changes not only increase the accuracy of the model, but also enable it to work faster and more efficiently.

- Traditional CNN models usually have 3-5 convolution layers. Our proposed model contains 9 convolution layers, and each of them is optimized with different filter sizes and channel numbers.
- In addition to the Adam optimization algorithm, modern optimization techniques such as SGD and RMSprop were tested. RMSprop optimization increased the accuracy rate by providing a more stable learning process compared to SGD.
- The risk of overfitting the model was reduced with learning rate adjustments.

Ablation study

To highlight the importance of each component that increases the accuracy of our model, an ablation study was conducted. Table 5 below shows how the accuracy changes when certain components of the model are removed:

Table 5. Using different hyper-parameters in the model

Model configuration	Accuracy (%)
Recommended full model	**99.76**
Standard CNN (3 layers, ReLU, MaxPooling)	92.34
Sigmoid function instead of ReLu	95.32
Sigmoid function instead of Softmax	97.21
SGD instead of Adam optimization algorithm	96.12
RMSprop instead of Adam optimization algorithm	98.45
Epoch number 30 instead of 60	97.89
Epoch number 100 instead of 60	99.41
Learning rate is 0.0001 instead of 0.001	99.12
Batch size 16 instead of 32	98.41
Batch size 64 instead of 32	98.74
Split ratio 70%-30%	98.91

Table 5 clearly shows the response of the model to hyperparameter adjustments. It is seen that our proposed model provides the best performance with 99.76% accuracy. However, when the standard CNN architecture is limited to only three layers, the accuracy drops to 92.34%, indicating that deeper architectures can generalize better. While using ReLU instead of Sigmoid increases the model accuracy, it is observed that when SGD is used instead of Adam as the optimization algorithm, the accuracy drops to 96.12%.

Reducing the learning rate to 0.0001 decreased the model accuracy to 99.12% and could not provide optimal learning. Increasing the epoch number to 100 shows that the model increases its learning capacity with 99.41% accuracy, but carries the risk of overfitting. In addition, when the batch size is reduced to 16, the accuracy is measured as 98.41%, while when it is increased to 64, it is measured as 98.74%. When the training-test split was changed to 70%-30%, the accuracy dropped to 98.91%, indicating that more test data had little impact on the model performance. According to the results in Table 5, we can say that we obtained the best model configuration with rigorous hyperparameter tuning.

k-Fold cross validation

In the cross-validation test, the dataset was divided into 5 different layers (k=5) and the model was trained and tested in each layer. The results are presented in Table 6 below:

Table 6. k-Fold cross validation results

Number of floors (k)	Average accuracy (%)	Standard deviation
k=3	99.42	0.21
k=5	99.56	0.18
k=10	99.61	0.14

According to Table 6, we can say that our model provides a stable accuracy rate on different data sets and has high generalizability. As a result of testing the model with different layer numbers (k), the highest accuracy rate of 99.61% was obtained for k=10 layers. It was observed that as the number of layers increased, the generalization ability and accuracy rate of the model increased, but the computational cost could increase at extremely high layer numbers. However, when the standard deviation values were also examined, the lowest standard deviation (0.14%) value was obtained for k=10 and it was seen that the model produced more stable results.

Especially when compared with k=3, it is understood that the accuracy rate is 99.42% but the standard deviation value is the highest with 0.21%. This indicates that the model works less stably and the results may show more variability. The accuracy for k=5 was 99.56% and the standard deviation remained at a medium level with 0.18%. When evaluated in general, it can be said that k=10 is the

most optimal choice as it offers the highest accuracy and the lowest variability.

Comparison to related studies

In our study, we evaluated the performance of our method in comparison with the other existing methods on the problem of diagnosing and classifying brain tumors. At this point, the comparison is made from two different perspectives. In the first case, we consider application studies with the first dataset. In the second case, we compare our proposed model with the results of papers published in prestigious journals with Dataset 2 that demonstrate high-accuracy classification from different deep learning architectures. The comparative results are summarized in Table 7 below.

Table 7. Comparative review of studies on brain tumors based on dataset 2

Reference	Method	Accuracy %
Vankdothu, Hameed, Fatima[29]	CNN-LSTM	92.00
Deepak et al. [38]	CNN and SVM	90.21
Badža et al. [39]	CNN	89.45
Abiwinanda et al. [40]	CNN	88.68
Sultan et al. [41]	DNN	90.21
Ayadi et al. [42]	CNN	95.71
Kumar et al. [43]	ResNet-50 and Global Average Pooling	95.10
Our proposed model (Dataset-2)	CNN	97.45
Our proposed model (Dataset-1)	CNN	99.76

This table shows various studies on the classification of brain tumors and the success rates of the proposed methods. Most of the studies used conventional neural networks (CNN) and deep learning techniques. In addition, some studies preferred combination methods such as CNN and LSTM (Long Short-Term Memory), support vector machines (SVM) and deep neural networks (DNN). According to Table 7, the success rates of brain tumor classification methods are generally high. For example, while 95.71% accuracy rate was obtained in Ayadi et al. [42] study, 95.10% accuracy rate was obtained in Kumar et al. [43] study. However, the proposed model (Dataset-2) reached the highest accuracy rates with a success rate of 97.45% and a success rate of 99.76% was obtained especially in Dataset-1. This shows that the proposed model performs better than most methods in the existing literature and provides high accuracy in brain tumor classification.

The differences between the accuracies of the methods used in various studies once again reveal how critical the model selection is. The high accuracy rate of the proposed model shows that the structural design, hyperparameters and training process of the model are effectively optimized. In addition, it has been observed that CNN-based methods generally work more efficiently with visual data and such deep learning models provide high success in the analysis of medical images such as brain tumors. This supports that the proposed model is the right choice in terms of the selected technique. The success of the model is directly related not only to the quality of the method used, but also to the quality and diversity of the dataset on which it was trained. For example, the presence of different accuracy rates in Dataset-1 and Dataset-2 indicates that factors such as the difficulty level of the images in the datasets, the size and diversity of the dataset can affect the performance of the model. At this point, the generalization ability of the datasets and the improvements made to prevent overfitting are also very important. It should be noted that high accuracy rates can be due to balanced, correctly labeled and sufficiently large datasets.

Table 7 clearly shows the previous studies on brain tumor classification and the superior performance of our proposed model. The high accuracy rates of the proposed model indicate that it will contribute to the advancement of research in this field and can be effectively used in future applications. In addition, it can be said that the model has the potential to generalize better compared to other methods. In terms of the robustness of the model, the consistently high accuracy rates of the proposed model show that it has a robust structure against noise and variability. The proposed model presents an innovative and effective solution by offering the best results in the current literature. The high accuracy rate of the model is supported by advanced optimization techniques, powerful network architecture and effective data processing strategies and can be an important reference point for future research.

Discussion

While formulating the methodology of our study, a pivotal consideration was the observation that CNN-based architectures offer the advantage of achieving high-accuracy classification while utilizing fewer parameters when contrasted with DNN architectures. Based on this point, we chose the CNN network architecture and while building our working model, we aimed to reduce the running time and achieve high efficiency by performing different experiments on the model. When we examined the literature, we found that some studies with the CNN approach indicated higher performance than many other DNN methods. The efficient CNN model we proposed in this study also outperformed many DNN models and indicated high classification accuracy.

We subjected our newly proposed CNN-based model to a diverse array of assessments, one of which involved evaluating its performance using various datasets. Recognizing the importance of gauging the model's adaptability to different data sources, we undertook the training process using distinct datasets. This approach aimed to provide a more comprehensive understanding of the model's capabilities. In pursuit of this objective, we

explored the performance metric outcomes of our model using the four-class dataset-2. This dataset, sourced from the Kaggle platform, was acquired without cost and is widely employed in studies related to tumor detection. By applying our model to this dataset, we sought to gain insights into its performance across different data contexts, thereby enhancing our understanding of its overall robustness. When we examined the results of our model for two different datasets, we observed that it indicated high classification success rates. These results prove the efficiency and generalization capability of our model.

We have already mentioned that in general, all deep learning approaches successfully perform disease detection and classification. The performance of these deep methods varies and they have their advantages and disadvantages. When we compare our model with DNN's advantages, we see that it lags behind in generating continuous signals. To overcome this problem, we can increase the dimensionality of the CNN model. Additionally, problems such as overfitting can be avoided by stopping training at an earlier stage or increasing the data. In our study, to overcome this problem, we stopped training at different stages and observed the results. Furthermore, another disadvantage of this approach is that it takes a long training time even with small data sets. Apart from these disadvantages, one of the biggest advantages of our model is that the number of layers and parameters can be changed. In this way, the CNN model can achieve the most satisfactory structure while detecting and classifying tumors. After trying many different methods in our CNN architecture, which we created from scratch, we finalized it in the light of the most appropriate results.

Our model has 52.77 million parameters, which is a structure that brings both a strong learning capacity and some challenges. While a large number of parameters allows the model to learn complex patterns and achieve high accuracy, it may also require more computational resources. However, thanks to this large capacity, our model can show superior performance on detailed and feature-rich datasets. However, a large model size can increase the risk of overfitting, but this risk can be reduced by methods such as dropout, data augmentation and regularization. We used some of these techniques to reduce these risks in our study. If the model is well optimized, a large number of parameters can increase its generalizability to new datasets since it offers a wider learning capacity. In this context, we optimized our model with the most appropriate hyperparameters and applied it on a different dataset to discuss its generalizability and robustness. In addition, techniques such as pruning and quantization, recall can be applied to reduce the computational cost while preserving the complexity of the model. We provided time efficiency by using the early stopping method from recall techniques. In summary, the large number of parameters of our model provides a strong learning capacity and at the same time creates some computational costs, but these problems have been overcome with correct optimizations.

Conclusion

The rapid identification and classification of brain tumors hold paramount significance in extending an individual's life expectancy. This paper introduces a novel deep learning model rooted in CNNs, designed to autonomously classify brain tumors within MR images. The MR images of brain tumors used in this study were sourced from the Kaggle platform, offering invaluable resources for researchers. Our proposed model embarks on its journey with preprocessing steps dedicated to refining brain images. To enhance image quality and eliminate noise, preprocessing techniques are applied to the images. Subsequently, image features are extracted and processed through a convolutional network.

Although our initial model yielded an impressive accuracy output, further tuning of parameter values propelled us to achieve an ultimate accuracy of 99.76%, thereby enhancing performance accuracy. As a pivotal step to combat overfitting, a dropout layer was integrated after the fully connected layer in our model. This strategic inclusion safeguards against the model's tendency to overly specialize in the training data.

To affirm the efficacy of our model, we conducted a comparative analysis against successful studies conducted with brain tumor MR images available on the Kaggle platform, which boasts a publicly accessible dataset. Furthermore, we juxtaposed our model's performance against the experimental findings published in esteemed journals. The outcome of our endeavors revealed that our novel CNN-based neural network model significantly elevates the accuracy of tumor-type classification. Notably, our experimental results illustrate that our model surpasses numerous transfer learning methodologies across pivotal evaluation criteria, including accuracy, precision, and F1 score. This substantiates the remarkable potential of our proposed model in enhancing brain tumor classification methodologies.

Ethics committee approval and conflict of interest statement

"There is no need to obtain permission from the ethics committee for the article prepared."
"There is no conflict of interest with any person / institution in the article prepared."

Author contributions

"The authors declare that they have contributed equally to the article."

References

[1] K. D. Miller, Q. T. Ostrom, C. Kruchko, N. Patil, T. Tihan, G. Cioffi, ... & J. S. Barnholtz-Sloan, "Brain and other central nervous system tumor statistics", *CA: a cancer journal for clinicians*, vol. 71, no. 5, *pp.* 381-406, Sep. 2021, DOI: 10.3322/caac.21693.

[2] Cancer.Net, Brain Tumor_Statistics_Cancer, (2022). Date of Access: 12.06.2024 from https://www.cancer.net/cancer-types/brain-tumor/statistics

[3] Cancer survival rate: A tool to understand your prognosis - Mayo Clinic, (n.d.). Date of Access: 02.07.2024, from https://www.mayoclinic.org/diseases-conditions/cancer/in-depth/cancer/art-20044517

[4] K. M. Iftekharuddin, J. Zheng, M. A. Islam & R. J. Ogg, "Fractal-based brain tumor detection in multimodal MRI", *Applied Mathematics and Computation*, vol. *207, no.*1, pp. 23-41, Jan. 2009, DOI: 10.1016/j.amc.2007.10.063.

[5] L. M. DeAngelis, "Brain tumors", N. Engl. J. Med., vol. 344, no.2, pp. 114– 123, Jan. 2001, [CrossRef] [PubMed].

[6] D. N. Louis, A. Perry, G. Reifenberger, et al. "The 2016 World Health Organization Classification of Tumors of the Central Nervous System: A summary", *Acta Neuropathol*, vol. 131, pp. 803–820, May 2016. [CrossRef] [PubMed].

[7] V. Kotu & B. Deshpande, "Data science: concepts and practice", Morgan Kaufmann, 2nd ed. 2019.

[8] B. Janeczko & G. Srivastava, ""The use of deep learning in image analysis for the study of oncology", In *Internet of Multimedia Things (IoMT)*, pp. 133-150, 2022, Academic Press,[Online]Available:https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780323858458000113

[9] R. Polikar, "Ensemble Learning", *Ensemble machine learning: Methods and applications*, Springer, New York, NY. pp. 1-34, Jan. 2012, https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9326-7_1

[10] O. Sagi & L. Rokach, "Ensemble learning: A survey", WIREs Data Mining and Knowledge Discovery, vol. 8, no. 4, Jul. 2018, 8:e1249, DOI: 10.1002/widm.124.

[11] E. Aslan, "Classification of Brain Tumor from MRI Images with LSTM-CNN Hybrid Model", *Adıyaman University Journal of Engineering Sciences*, vol. 11, no. 22, pp. 63–81, 2024, doi: 10.54365/adyumbd.1391157.

[12] Brain tumor. (2019, April 27). Date of Access: 15.12. 2024, from https://www.mayoclinic.org/diseases-conditions/brain- tumor/symptoms-causes/syc-20350084.

[13] MD. Charles Patrick Davis, "Cancer Causes, Types, Treatment, Symptoms & Signs", MedicineNet, MedicineNet, Date of Access: 20.07.2023, from https://www.medicinenet.com/cancer/article.htm

[14] S. A. Swapnil & V. S. Girish (2020, March). Image Mining Methodology for Detection of Brain Tumor: A Review. Presented at ICCMC Annual Meeting. IEEE.[Online].Available:https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9076409

[15] U. A. Dere. (2017). What is a brain tumor? Date of Access: 09.05.2024, from https://ankara.baskenthastaneleri.com/magazine/sayi30/files/assets/common/downloads/publication.pdf

[16] D. R. Johnson, J. B. Guerin, C. Giannini, J. M. Morris, L . J. Eckel & T. J. Kaufmann, "2016 updates to the WHO brain tumor classification system: what the radiologist needs to know", *RadioGraphics*, vol. 37, no. 7, pp. 2164-2180, Oct. 2017, DOI: 10.1148/rg.2017170037

[17] Acıbadem Web and Editorial Board (2019). Date of Access: 24.06.2024, from http://acibadem.com.tr/ilgi-alani/gliomlar/

[18] Y. Aras (2022). What are the types of brain tumors? Date of Access: 24.10.2024, from https://kolanhastanesi.com.tr/saglik-rehberi/beyin-tumoru-turleri-nelerdir

[19] Braın and Nerve Surgery (Neurosurgery) (2023). What are brain tumor symptoms? What are the treatment methods? Date of Access: 25.07.2024, from https://www.medicalpark.com.tr/beyin-tumorleri/hg-1539

[20] L. Sprincl, J. Vozenílek, J. Vedralová, et al, "Use of a computer program in the diagnosis of brain tumors", Cesk Patol, vol. 21, no. 4, pp. 218-222, Nov. 1985, PMID: 3905026

[21] E. Aslan, M. A. Arserim & A. Uçar, "Development of Push-Recovery control system for humanoid robots using deep reinforcement learning", *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 14, no. 10, 102167, Oct. 2023, DOI: 10.1016/j.asej.2023.102167.

[22] A. Geçmez & Ç. Gençer (2021, June). Wind Energy Production Estimation with ANN and ANFIS, Presented at *icSmartGrid*, Setubal, Portugal, pp. 167-173. [Online]. Available:https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9551254

[23] E. H. Houssein, M. M. Emam & A. A. Ali, "An optimized deep learning architecture for breast cancer diagnosis based on improved marine predators algorithm", *Neural Computing and Applications*, vol. *34, no.* 20, pp. 18015-18033, Jun. 2022, DOI:10.1007/s00521-022-07445-5.

[24] N. Ganatra & A. Patel, "A comprehensive study of deep learning architectures, applications and tools", Int. j. comput. sci. eng, vol. 6, no. 12, pp. 701-705, Dec. 2018, DOI: 10.26438/ijcse/v6i12.701705.

[25] F. Doğan & İ. Türkoğlu, "A compilation of deep learning models and application areas", Dicle University Engineering Faculty Journal of Engineering, vol. 10, no. 2, pp. 409-445, 2019.

[26] K. A. Kumar, A. Y. Prasad & J. Metan, "A hybrid deep CNN-Cov-19-Res-Net Transfer learning architype for an enhanced brain tumor detection and classification scheme in medical image processing", *Biomedical signal processing and control*, vol. *76*, 103631, Jul. 2022, DOI: 10.1016/j.bspc.2022.103631

[27] Y. Bhanothu, A. Kamalakannan & G. Rajamanickam (2020, March). Detection and classification of brain tumor in MRI images using deep convolutional network, Presented at *6th ICACCS,* Coimbatore, India, pp. 248-252, IEEE.[Online].Available: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9074375

[28] A. Çinar & M. Yildirim, "Detection of tumors on brain MRI images using the hybrid convolutional neural network architecture", *Medical hypotheses*, vol. *139*, 109684, Jun. 2020, DOI: 10.1016/j.mehy.2020.109684

[29] R. Vankdothu, MA. Hameed & H. Fatima, "A brain tumor identification and classification using deep learning based on CNN-LSTM method", Computers and electrical

engineering, vol. 101, 107960, Jul. 2022, DOI:10.1016/j.compeleceng.2022.107960

[30] S. Patil. & D. Kirange, "Community of Deep Learning Models for Brain Tumor Detection", Procedia computer science, vol. 218, pp. 2468-2479, 2023.

[31] M. Aslan, "Deep learning based automatic brain tumor detection", Fırat university journal of engineering sciences, vol. 34, no.1, pp. 399-407, Mar. 2022, DOI:10.35234/fumbd.1039825

[32] S. Deepak & P. M. Ameer, "Brain tumor classification using deep CNN features via transfer learning", *Computers in biology and medicine*, vol. 111, 103345, Aug. 2019, DOI:10.1016/j.compbiomed.2019.103345

[33] M. I. Nazir, A. Akter, M. A. H. Wadud ve M. A. Uddin, "Utilizing customized CNN for brain tumor prediction with explainable AI," *Heliyon*, cilt. 10, sayı. 20, 2024.

[34] E. Goceri, "An efficient network with CNN and transformer blocks for glioma grading and brain tumor classification from MRIs," *Expert Systems with Applications*, cilt. 268, s. 126290, 2025.

[35] Math & Physics with Gus (2023). CNN Brain Tumor Classification. Date of Access:12.08.2023, from https://www.kaggle.com/code/guslovesmath/cnn-brain-tumor-classification-99-accuracy

[36] S. Bhuvaji (2020). Brain Tumor Classification (MRI). Date of Access:12.08.2023, from https://www.kaggle.com/datasets/sartajbhuvaji/brain-tumor-classification-mri

[37] E. Aslan & Y. Özüpak, "Detection of road extraction from satellite images with deep learning method", *Cluster Comput*, vol. 28, no. 72, 2025, DOI:10.1007/s10586-024-04880-y

[38] S. Deepak & P. M. Ameer, "Automated categorization of brain tumor from mri using cnn features and svm", *Journal of ambient intelligence and humanized computing*, vol. *12*, pp. 8357-8369, Oct. 2021, DOI:10.1007/s12652-020-02568-w

[39] M. M. Badža & M. Č. Barjaktarović, "Classification of brain tumors from MRI images using a convolutional neural network", *Applied sciences*, vol. *10, no.*6, 1999, Mar. 2020, DOI:10.3390/app10061999

[40] N. Abiwinanda, M. Hanif, S. T. Hesaputra, A. Handayani & T. R. Mengko (2018, June). Brain tumor classification using convolutional neural network, Presented at WCMPBE, *Prague, Czech Republic, vol. 1,* pp. 183-189, Springer Singapore. [Online]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-10-9035-6_33

[41] H. H. Sultan, N. M. Salem & W. Al-Atabany, "Multi-classification of brain tumor images using deep neural network", *IEEE access*, vol. *7*, pp.69215-69225, May. 2019, DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2919122

[42] W. Ayadi, W. Elhamzi, I. Charfi & M. Atri, "Deep CNN for brain tumor classification", *Neural processing letters*, vol. *53*, pp. 671-700, Jan. 2021, DOI: 10.1007/s11063-020-10398-2

[43] R. L. Kumar, J. Kakarla, B. V. Isunuri & M. Singh, "Multi-class brain tumor classification using residual network and global average pooling", *Multimedia tools and applications*, vol. *80*, pp. 13429-13438, Jan. 2021, DOI: 10.1007/s11042-020-10335-4

Dicle University
Journal of Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/dumf
duje.dicle.edu.tr

Araştırma Makalesi / Research Article

Web Uygulamalarına Yönelik Siber Saldırıların Tespitinde Derin Öğrenme Yöntemleri Kullanılarak Güvenlik Duvarı Uygulamasının Geliştirilmesi

The Development of a Firewall Application Using Deep Learning Methods for Detection of Cyber Attacks on Web Applications

Şengül Bayrak[1*], Alper Karaca[2], Ferhat Toson[3], Mehmet Emin Tayfur[4], Selçuk Yavaş[5]

[1] İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, bayraksengul@ieee.org
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4114-4305

[2] İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, alper.krc@outlook.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-8167-4013

[3] İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, ferhattoson@hotmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-1493-3702

[4] İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, mehmetemin.tayfur@outlook.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-6647-223X

[5] İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, selcuk.yavas@outlook.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-6649-6719

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 17 Şubat 2025
Revizyon 22 Mart2025
Kabul 2 Mayıs 2025
Online 30 Haziran 2025

Anahtar Kelimeler:

Makine Öğrenmesi, Derin Öğrenme, Güvenlik Duvarı, Saldırı Tespiti, Siber Güvenlik, Web Uygulaması

ÖZ

Web uygulamalarının güvenliği, kullanıcı verilerinin korunması ve siber saldırılara karşı önlem alınması açısından kritik bir öneme sahiptir. İnternet kullanıcılarının hassas verilerini koruma, siber saldırılara karşı önlem alma ve kullanıcı deneyimini iyileştirme gibi amaçlarla güvenlik duvarı uygulamaları kullanılmaktadır. Geleneksel güvenlik duvarı yaklaşımları, belirli kurallar ve kalıplara dayanarak saldırıları tespit etmeye çalışsa da gelişen ve karmaşık hale gelen saldırı türlerine karşı yetersiz kalabilmektedir. Bu çalışmada, web uygulamalarına yönelik siber saldırıları tespit etmek için derin öğrenme tabanlı bir yaklaşım önerilmektedir. Önerilen yöntem, "FWAF" veri seti kullanılarak geliştirilmiş ve veri ön işleme, özellik çıkarımı ve veri ölçekleme aşamalarından geçirilmiştir. Altı farklı derin öğrenme modeli değerlendirilerek en yüksek doğruluk ve güvenilirliği sağlayan yöntem belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, model performanslarını karşılaştırmalı olarak inceleyerek optimum yöntemin seçiminde önemli bir rol oynamıştır. Seçilen model, gerçek zamanlı çalışabilirliğini test etmek amacıyla Jetson Nano platformu üzerinde canlıya alınarak performansı değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, derin öğrenme tabanlı yaklaşımların geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek doğruluk oranları sunduğunu ve yeni saldırı türlerine adapte olabildiğini göstermektedir. Bu çalışma, web uygulamalarına yönelik saldırıların tespitinde etkili ve dinamik bir güvenlik çözümü sunarak, siber güvenlik alanında önemli bir katkı sağlamaktadır.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 17 February 2025
Received in revised form 22 March 2025
Accepted 2 May 2025
Available online 30 June 2025

Keywords:

Machine Learning, Deep Learning, Firewall, Intrusion Detection, Cybersecurity, Web Application

ABSTRACT

The security of web applications is critical for protecting user data and taking precautions against cyber-attacks. Firewall applications are used to protect Internet users' sensitive data, take precautions against cyber-attacks and improve the user experience. Although traditional firewall approaches try to detect attacks based on certain rules and patterns, they may be insufficient against evolving and complex attack types. In this paper, we propose a deep learning based approach to detect cyber attacks on web applications. The proposed method is developed using the "FWAF" dataset and goes through stages that are data preprocessing, feature extraction, and data scaling. Six different deep learning models are evaluated to determine the method with the highest accuracy and reliability. The results obtained played an important role in the selection of the optimum method by comparing the model performances. The selected model was put live on the Jetson Nano platform to test its real-time operability and its performance was evaluated. Experimental results show that deep learning-based approaches offer higher accuracy rates compared to traditional methods and can adapt to new types of attacks. This study makes an important contribution to the field of cyber security by providing an effective and dynamic security solution for detecting attacks against web applications.

DOI: 10.24012/dumf.1634525

* Sorumlu Yazar

Giriş

Web saldırıları, web sitelerine veya web uygulamalarına yapılan kötü niyetli girişimlerdir. Günümüzde web uygulamaları, bireylerden büyük ölçekli kuruluşlara kadar geniş bir kullanıcı kitlesi tarafından yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak, bu yaygın kullanım, siber saldırılara karşı açık hedef haline gelmelerine de neden olmaktadır. Web tabanlı saldırılar, kullanıcıların hassas verilerini ele geçirmek, hizmetleri kesintiye uğratmak veya sistemlerin güvenliğini tehlikeye atmak amacıyla gerçekleştirilmektedir. Bilgi çalmak ve hizmet kesintisi yaratmak bu saldırıların temel amaçlarıdır. Yapısal Sorgu Dili (Structured Query Language – SQL) Enjeksiyonu, Siteler Arası Komut Dosyası Çalıştırma (Cross-Site Scripting - XSS), Dağıtılmış Hizmet Reddi Saldırısı (Distributed Denial of Service - DDoS), Brute Force Saldırıları, Phishing bu saldırılardan bazılarıdır. Bu saldırıları engellemek için Makine Öğrenimi ve Yapay Zeka, AI Destekli Bot Engelleme ve Web Uygulamaları Güvenlik Duvarı (Web Application Firewall - WAF) gibi yöntemler kullanılmaktadır. WAF'ın temel işlevi, web uygulamalarına gelen istekleri denetlemek, filtrelemek ve kötü niyetli trafikleri engellemektir. Bu sayede potansiyel saldırıları, kötü amaçlı yazılımları, veri sızıntılarını ve diğer web uygulaması güvenlik açıklarını sınırlamaya yardımcı olmaktadır. WAF, HTTP isteklerini denetler ve belirlenmiş kurallara göre filtreler, kötü amaçlı trafikleri engeller, kullanıcıların kimlik doğrulama süreçlerini izler ve yetkilendirme kontrolleri uygulamaktadır. Ancak, bu yöntemler önceden tanımlanmış saldırı imzalarına dayanmakta ve yeni veya karmaşık saldırı türlerine karşı yetersiz kalmaktadır. Son yıllarda, yapay zeka ve özellikle derin öğrenme tabanlı yaklaşımlar, daha adaptif ve öğrenme kabiliyetine sahip güvenlik çözümleri sunma potansiyeli taşımaktadır. Bu çalışma, web uygulamalarına yönelik siber saldırıları tespit etmek amacıyla derin öğrenme modelleri kullanarak optimum yöntemi belirlemeyi amaçlamaktadır. FWAF veri seti üzerinde gerçekleştirilen çalışmada, altı farklı derin öğrenme modeli değerlendirilmiş ve en yüksek doğruluk oranına sahip model seçilmiştir. Modelin gerçek zamanlı ortamda uygulanabilirliğini test etmek amacıyla Jetson Nano platformunda performans analizleri gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma, web uygulamalarına yönelik saldırıları tespit etmek için kullanılan geleneksel yöntemlerin eksikliklerini ele almakta ve derin öğrenme tabanlı bir yaklaşım sunarak literatürdeki boşluğu doldurmayı hedeflemektedir. Yapılan deneysel analizler, önerilen yöntemin saldırı tespitinde yüksek doğruluk oranlarına ulaştığını ve mevcut sistemlere kıyasla daha dinamik bir yapı sunduğunu göstermektedir.

Bu makalenin geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir. Materyal ve Yöntem bölümünde ilgili bu çalışmada kullanışmış olan DL modelleri detaylandırılmıştır ve kullanılan performans ölçütleri ve geliştirilen DL modelin entegrasyonu ile ilgili detaylar verilmiştir. Deneysel Çalışmalar bölümünde DL tabanlı modeller ile elde edilen sonuçlar verilmiştir. Daha sonra çalışmanın sonuçları ve gelecek hedefleri ile ilgili detaylar verilmiştir.

Literatür Taraması

Literatürde web uygulamalarına yönelik siber saldırıların tespit edilmesinde geliştirilen makine öğrenmesi, derin öğrenme tabanlı yaklaşımlar vardır. Brown ve arkadaşları [1], statik, dinamik ve çevrimiçi kötü amaçlı yazılım tespiti için AutoML kullanımı üzerine kapsamlı bir analiz ve içgörüler sunmuştur. Statik analiz için büyük veri kümeleri üzerindeki etkinliği göstermek için SOREL-20M ve makine öğrenimi modellerinin performansını zorlaştırmak amacıyla özel olarak hazırlanan daha küçük EMBER-2018 veri kümesini kullanmışlardır. Otomatik Makine Öğrenimi (AutoML) ile çevrimiçi kötü amaçlı yazılım tespiti senaryolarında, bulut IaaS için Hücresel Sinir Ağları (Convolutional Neural Networks – CNN) kullanmışlardır. SOREL-20M veri seti ile %99,8, EMBER 2018 veri seti ile %98,4 başarım elde etmişlerdir. Çevrim içi kötü amaçlı yazılım yakalamada Baseline'da en başarılı model Darts AutoML ile %98,9 başarım elde etmişlerdir. Uygulamada yine 7 katmanlı Darts AutoML ile %98,6 doğruluk başarımı elde etmişlerdir. Web uygulamaları, kullanıcıların bilgiye anında erişimini sağlayarak ve işletmelerin erişim alanlarını genişletmelerine olanak tanıyarak dijital ortamın merkezi haline gelmiştir. SQL enjeksiyonu (SQLi) gibi enjeksiyon saldırıları, çoğu web uygulamasının bir veri tabanı sistemini entegre ettiği göz önüne alındığında, web uygulamalarına yönelik öne çıkan saldırılardır. Paul ve ekibi [2], SQLi saldırısını çok sınıflı, çoklu saldırı vektörü, önceliklendirme ve önleme problemi olarak formüle etmektedirler. Saldırı tespiti ve sınıflandırması için 457,233 iyi huylu ve kötü huylu ağ trafiği örneğinin yanı sıra SQLi ve iyi huylu yüklere sahip 70,023 örnek toplamışlardır. Birkaç makine öğrenimi tabanlı algoritmanın değerlendirilmesinin ardından, hibrit CNN-LSTM modelleri web ve ağda ortalama 0,97 F1-skoruna ulaşmıştır. Çalışmanın sonuçlarını Vulnerable Web Application (DVWA) ve Vulnado gibi bilinen savunmasız web uygulamalarının boru hattına entegre ederek ve gerçek zamanlı tespit için SQLMap ile yürütülen SQLi DNS sızıntısından Wireshark kullanılarak yakalanan ağ trafiği aracılığıyla öne çıkarmışlardır. Dawadi vd. [3] DDoS, SQL enjeksiyonu ve XSS gibi tehditlerden korunmak için normal HTTP trafiği ile saldırı trafiği arasında karşılaştırmalı bir analiz yapmışlardır. ISCX, CISC ve CICDDoS standart veri setlerinden çeşitli özellikleri incelemiş ve normal ile saldırı trafiği arasındaki farkları belirlemişlerdir. Çalışmada, DDoS, XSS ve SQL enjeksiyonu saldırılarını tespit etmek üzere bir katman mimari modeli geliştirilmiştir. Simülasyon ortamından toplanan verilerle oluşturulan LSTM tabanlı bu mimarinin ilk katmanı, %97,57 doğruluk oranıyla DDoS tespit modeli olarak tasarlamışlardır. İkinci katman ise XSS ve SQL enjeksiyonu tespiti için %89,34 doğruluk oranı elde etmişlerdir. Yüksek HTTP trafiği önce incelenmiş, filtrelenmiş ve ardından ikinci katmana iletilmiştir. WAF, geleneksel ağ güvenlik duvarlarının sağlayamadığı uygulama düzeyinde filtreleme yaparak web uygulamalarına ek bir güvenlik katmanı ekleyerek

literatüre katkı sağlamışlardır. Köksal vd. [4], Kanada Siber Güvenlik Enstitüsü'nün (ISCX-URL-2016) Tekdüzen Kaynak Bulucu (Uniform Resource Locator - URL) veri seti kullanılarak iyi huylu ve kötü huylu URL'lerin sınıflandırılması için toplulukla öğrenme yöntemleri ve Rastgele Orman algoritması kullanılmıştır. Sonuçlar, ortalama %99,42 doğruluk oranıyla ikili sınıflandırma ve %95,68 doğruluk oranıyla çoklu sınıflandırma başarısı göstermektedir. Uçar vd. [5], ISCX-URL-2016 veri kümesi üzerinde zararlı URL'lerin tespiti için bir Derin Öğrenme (Deep Learning – DL) modeli geliştirilmiştir. Bu model, iyi huylu ve kötü niyetli URL'leri tespit etmek için DL algoritmaları olan Uzun Kısa Süreli Bellek (Long Short Term Memory – LSTM) ve CNN modellerini kullanmışlardır. Deneysel sonuçlara göre, LSTM'in %91 doğruluk oranı ve CNN'in %95 doğruluk oranı ile zararlı web sayfalarının tespitinde önemli bir başarı sağlamıştır. Abdi ve Wenjuan [6] 344,821 iyi niyetli URL ve 75,643 kötü niyetli URL üzerinde yapılan deneylerde, basit bir algoritma kullanılarak kötü niyetli URL'leri tespit etme başarısı %96'dan yüksek bir doğruluk oranı elde etmiştir. Bu algoritmada, geleneksel kara liste kullanımının yerine makine öğrenimi teknikleri tercih edilmiştir. Tiryaki vd. [7], 7 katmanlı Tekrarlayan Sinir Ağları (Recurrent Neural Networks – RNN) modeli kullanılarak ulusal ve uluslararası benzer iki veri setinin birleştirilmesiyle devasa bir veri seti oluşturulmuş ve zararlı URL adreslerinin tespitinde %91'in üzerinde başarı elde edilmiştir. Moghimi ve Varjani [8] phishing özellikleri taşıyan web sitelerinin sınıflandırılması için Yapay Sinir Ağı (Artificial Neural Network - ANN) modeli, özellikle de Çok Katmanlı Algılayıcı (Multi Layer Perceptron - MLP) tipi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, bu modelin %99,14 başarı oranıyla bu tür web sitelerini sınıflandırmada etkili olduğunu göstermektedir. Ismail ve ekibi [9], web uygulama saldırılarını tespit etmek için 19 geleneksel makine öğrenimi tekniğinin derinlemesine bir değerlendirmesini sunmaktadır. Değerlendirme, HTTPCSIC 2010 veri setinden türetilen rafine veri setleri üzerinde Sinir Ağları ile %90 başarım ile model geliştirmişlerdir. Günümüz güvenlik duvarları önceden verilmiş veriler dışında bir saldırıyla karşılaştığında cevap verememekte ve onu kullanan sistemi yeni saldırılardan koruyamamaktadır. 2001 yılında web uygulamalarındaki güvenlik açıkları ile birlikte Open Web Application Security Project (OWASP) başlatılmıştır [10] Literatürde son yıllarda hazır veri setleri ile geliştirilen siber saldırı tespit sistemleri incelendiğinde Baysal [11], bir web sitesinde alkol görüntüsü var ise "mitmproxy" aracı ile modeli birleştirerek alkol fotoğrafının yüklenmesini engelleyerek içerik filtrelemesi yapan bir güvenlik duvarı oluşturmuştur. Sezer ve Ali [12] çalışmalarında CSIC web uygulamaları veri setini LSTM + Word2Vec ile modelleyerek web sayfasına yapılan siber atakları %99,4 F1-skoru ile tespit edebilmişlerdir. Demir ve Aslan [13] çalışmalarında K-en yakın komşuluk yöntemi ile Fırat Üniversitesi Firewall Cihazını %98,40 doğrulukla modellemişlerdir. Demir [14] çalışmasında ISCX-2012 veri seti ile çalışmıştır. Karar ağacı ile %100 doğruluk başarımı elde etmiştir. Takaoğlu ve Çağdaş [15] elle oluşturdukları veri seti ile Destek Vektör Makinesi ve Naif Bayes yöntemleri ile modelleme sonucunu sırasıyla %79,00 ve %71,00 olarak elde etmişlerdir. Einy [16], hem yüz sahtekarlığı hem de ağ anomalisi tespiti için Çok Amaçlı Parçacık Sürüsü Algoritmasına dayalı Özellik Seçimi ve Hızlı Öğrenme Ağının Kombinasyonu ile %99,60 doğruluk oranı elde etmiştir. Seyyar vd. [17], web uygulamalarının tüm alanlarda kullanımının artması ve web uygulamalarına yönelik saldırıların artmasıyla birlikte ortaya çıkan güvenlik tehditlerini ele alan bir web saldırı tespit sistemi modellemiştir. Web saldırı tespit sistemi normal ve anormal URL ayırt edebilen bir modelden oluşmaktadır. URL analizi aşamasında BERT modelini kullanmışlardır. Sınıflandırma aşamasında CNN modeli kullanmışlardır. Eğitim ve test için CSIC 2010, FWAF ve http Params veri %96'nın üzerinde bir doğruluk elde etmişlerdir. Baş ve Süzen [18] çalışmalarında web uygulamalarındaki güvenlik açıklarını tespit etmede açıklanabilir yapay zekanın katkısını inceleyerek, geliştirme ve uygulama süreçlerinde nasıl kullanılabileceğini işlemişlerdir. Turgut ve Daş [19], akıllı şebeke güvenliğini artırmaya yönelik yeni IDS tekniklerinin geliştirilmesine katkıda bulunmak için hem bileşene özgü hem de genel sistem değerlendirmelerini analiz etmişlerdir. Arslan [20] gerçek zamanlı tespit gerekliliği nedeniyl ön işleme yöntemi ile internet trafiği daha hızlı işlenebilir hale getirmiş ve makine öğrenimi ile sınıflandırma yapmıştır. CSE-CIC-IDS2018 veri setinde test edilen model, hem yüksek başarı oranı hem de işlem süresinde ciddi iyileşmeler sağlamıştır. İkili sınıflandırmada ExtraTree algoritmasıyla %99,00 doğruluk ve %82,96 işlem süresi azaltımı; çok sınıflı (15 sınıf) tespitte ise Rasgele Orman ile %98.5 doğruluk ve %64.43 işlem süresi azaltımı elde edilmiştir. Xu ve ekibi [21] düşük kaynaklı ortamlarda büyük dil modelleri (LLM) kullanarak anormal kullanıcı davranışlarını tespit etmeye yönelik yeni bir yaklaşım sunmuşlardır. Çalışmalarında, sistem günlüklerinden örtük nedensel ilişkiler çıkararak davranış grafikleri oluşturup ve etiket gerektirmeyen grafik karşıt öğrenimi ile nedensel özellik vektörleri üretmişlerdir. Çok ajanlı yapıdaki modelde, anlatıcı ve karar verici ajanlar açıklayıcı metin üretimini geliştirirken, çevirici ajan bu vektörleri anlamlı metinlere dönüştürmüştür. WAB veri setinde yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan yöntemin geleneksel yöntemlere kıyasla daha az kaynakla daha etkili analiz sağladığını ve güvenlik uzmanları için anlaşılır çıktılar sunduğunu göstermişlerdir. Salahat ve ekibi [22] SQLi ve XSS saldırılarına karşı makine öğrenimi tabanlı bir çözüm sunmuşlardır. Gerçek saldırı verilerinden oluşan büyük bir veri kümesi kullanılarak TF-IDF yöntemiyle anlamlı özellikler çıkarılmış ve Lojistik Regresyon modeli ile istekler zararlı ya da güvenli olarak sınıflandırılmıştır. Sistem, pfSense güvenlik duvarıyla entegre edilerek tehditlerin tespitinin yanı sıra zararlı kullanıcıların gerçek zamanlı engellenmesi sağlanmıştır. Test sonuçları, modelin %97 doğrulukla saldırıları tespit ettiğini göstermektedir. Wang ve ekibi [23], paket düzeyinde çalışan ve istatistiksel ile zamansal öznitelikleri içeren kısmi akış (partial-flow) temelli yeni bir öznitelik çıkarım yöntemi önermişlerdir. Bu yöntem, CSE-CIC-

IDS 2018 veri setinin oluşturulmasında kullanılan PCAP dosyalarına uygulanarak web saldırı tespiti için özel olarak geliştirilmiş WKLIN-WEB-2023 veri seti oluşturulmuştur. Her iki veri seti üzerinde dokuz farklı sınıflandırma modeli eğitilerek karşılaştırmalı bir değerlendirme yapılmıştır. WKLIN-WEB-2023 veri setiyle eğitilen modellerin; kesinlik, duyarlılık, F1 skoru ve tespit gecikmesi gibi ölçütlerde CSE-CIC-IDS 2018'e göre üstün performans sergilediğini göstermişlerdir. Gallego ve ekibi [24], 100.000'den fazla isteği içeren sentetik bir veri kümesi üzerinde, Naïve Bayes, k-en yakın komşu, destek vektör makineleri ve doğrusal regresyon gibi yapay zeka tabanlı sınıflandırma modellerinin kötü amaçlı istekleri tespit etme performansı incelemişlerdir. Uygulanan modeller, %92 ile %99 arasında değişen başarı oranları ile yüksek doğrulukta kötü niyetli istekleri sınıflandırarak tespit performansının optimize edilebileceğini göstermiştir.

Web uygulamalarına yönelik siber saldırı tespitinde kullanılan geleneksel ve modern yaklaşımlar çeşitli makine öğrenimi ve derin öğrenme modelleriyle geliştirilmektedir. Geleneksel makine öğrenme modelleri ile geliştirilen çalışmaların daha az hesaplama gücü gerektirdiği ve çeşitli veri setleri ile uygulanabilir oldukları tespit edilmiştir. Fakat bu çalışmaların karmaşık saldırı türlerinin tespitinde yeterince esnek olmadığı, veriye bağımlı oldukları ve veri boyutu arttıkça hesaplama maliyetinin de arttığı görülmektedir [9, 13]. Topluluk öğrenmesi modeli ile geliştirilen çalışmanın çoklu öğrenme tekniklerini birleştirerek daha yüksek doğruluk sağladığı görülmektedir. Fakat daha yavaş hesaplama süresi ve büyük veri setleri ile optimize edilmesi zor olduğu görülmektedir [4]. CNN ve LSTM tabanlı derin öğrenme ile geliştirilen modellerin sürekli öğrenme kapasitesi ve sekans bazlı veriler için uygun olması avantajdır. Fakat bu çalışmaların yüksek hesaplama maliyeti gerektirmesi ve aşırı uyum göstermesi risk olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca kelime gömme modellerinin optimize edilmesi zorluğu da dezavantajdır [2, 12]. RNN ve Transformer tabanlı geliştirilen çalışmaların zaman serilerinde başarılı olduğu ve BERT tabanlı modelin bağlamsal anlam çıkarma konusunda güçlü olması avantajdır. Fakat hesaplama maliyetinin yüksek olması, uzun bağlılıklarda unutma probleminin olması, yüksek hesaplama maliyeti ve optimizasyon zorluğu dezavantajlardır [7, 17]. Otomatik makine öğrenimi ile geliştirilen çalışmanın model optimizasyonu ve hiperparametre ayarlamaları otomatize edilerek insan hatasından arındırılması yönüyle güçlüdür. Fakat, bu çalışmadaki gibi gerçek zamanlı uygulamalar için maliyetli ve yüksek hesaplama gücü gereksinimi eksikliktir [1]. Hibrit ve alternatif yaklaşımla geliştirilen çalışmanın hızlı öğrenme kapasitesiyle çok yönlü bir model sağlarken, optimizasyon için karmaşık hesaplama gerektirmektedir [16].

Literatürde yapılmış çalışmalara göre, makine öğrenmesi ve derin öğrenme modelleri, web uygulamalarına yönelik siber saldırıları tespit etmek için güçlü araçlar sunmaktadır. CNN, LSTM ve Transformer tabanlı yaklaşımlar daha esnek ve dinamik olsalar da hesaplama maliyetleri yüksektir. Otomatik makine öğrenmesi ise otomatizasyon sağlasa da gerçek zamanlı uygulamalarda sınırlamaları olabilmektedir. Web uygulamaları için siber saldırı tespit sistemlerinde geliştirilen modellerin başarımlarının iyileştirilmesi ve etkin kullanılabilecek özgün bir güvenlik duvarının eksikliği mevcuttur. Literatürde daha iyi sonuçların elde edildiği yeni çalışmalara ihtiyaç vardır. Bu çalışma ile birlikte web uygulamalarının güvenlik zafiyetleri otomatik tespit edilebilecek ve saldırıları engelleme konusunda katkı sağlayacaktır. Derin öğrenme algoritmalarının kullanılmasıyla birlikte, daha geniş bir saldırı yelpazesini tanımlayan ve oluşabilecek bir güvenlik zafiyetinde etkili bir şekilde savunma sağlama potansiyeli sunacaktır.

Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada uygulanan veri ön işleme, model eğitimi ve değerlendirme aşamaları Şekil 1'deki kaba kod ile verilmiştir.

Algoritma 1 Derin Öğrenme ile Web Saldırılarını Tespit Etme

Veri Ön İşleme:
$dataset \leftarrow$ FWAF veri setini yükle() url in $dataset$
$domain \leftarrow$ Alan adını çıkar(url)
$path \leftarrow$ URL decode($url \setminus domain$)
Özellik vektörü $\leftarrow$ 23 özellik çıkar($path$)
Ölçeklenmiş özellikler $\leftarrow$ Robust Scaling uygula(Özellik vektörü)

Model Eğitimi:
$models \leftarrow$ {CNN, LSTM, GRU, CNN-LSTM, RNN, DNN} $model$ in $models$
Eğitim verisi, Test verisi $\leftarrow$ Veriyi böl(Ölçeklenmiş özellikler)
$trained_model \leftarrow model.fit$(Eğitim verisi)
$performance \leftarrow model.evaluate$(Test verisi)

$best_model \leftarrow$ En yüksek performanslı modeli seç($models$)
Tarayıcı Eklentisi Uygulaması:
while Kullanıcı internette geziniyor **do**
    $current_url \leftarrow$ Kullanıcının ziyaret ettiği URL'yi yakala()
    $processed_url \leftarrow$ Ön işleme uygula($current_url$)
    $prediction \leftarrow best_model.predict(processed_url)$
    if $prediction ==$ "zararlı" **then**
        Web sitesine erişimi engelle()
        Kullanıcıyı uyar()
    else
        Erişime izin ver()
    end if
end while

Şekil 1. Çalışmanın adımları.

Şekil 1'e göre, çalışmada, web ortamında gelen her verinin doğasına uygun ön işleme yöntemi uygulanmıştır. Veri setinden özellik çıkardıktan sonra bu sayısal değerleri aynı aralıklara getirmek için veri ölçekleme uygulanmıştır. Web saldırı tespitinde metin verilerini kullanarak DL mimarilerini eğitmek için bu verileri sayısal vektörlere çevrilmiştir.

Veri Ön İşleme

Metindeki özel karakterler, semboller ve biçimlendirme hataları temizlenme aşamasıdır. Metni sözcüklere veya cümlelere bölme işlemidir. Metin ön işleme tamamlandıktan sonra metin sayısal formata dönüştürülerek modellemeye hazır hale girilmesi aşamasıdır [25, 26]. Bu çalışmada kullanılan FWAF veri

setindeki URL'ler üzerinde ön işleme adımları uygulanmıştır. İlk aşamadaki URL'lerin alan adı (domain) kısımları çıkarılarak sadece yol (path) ve parametre kısımları üzerinde çalışılmıştır. Bu yaklaşımın temel nedeni, saldırı örüntülerinin çoğunlukla URL'nin bu bölümlerinde yer almasıdır. Alan adı çıkarıldıktan sonra kalan kısımda URL kodlanmış (encoding) karakterler çözümlenmiştir (decode). Bu işlemler sonucunda elde edilen temizlenmiş URL'ler, özellik çıkarımı aşamasına hazır hale gelmiştir.

Özellik Çıkarımı

Web saldırılarının tespiti için URL'lerden 23 adet anlamlı özellik çıkarılmıştır. Bu özellikler dört ana kategoriye ayrılmıştır:

Saldırı Örüntü Özellikleri

- '**is_xss**': XSS (Cross-Site Scripting) saldırısında kullanılan '*<script>*', '*alert()*', '*onerror=*' gibi örüntülerin varlığını kontrol eder.

- '**is_lfi**': LFI (Local File Inclusion) saldırılarında kullanılan '*../*', '*/etc/passwd*', '*../../*' gibi dizin geçiş örüntülerini tespit eder.

- '**is_oci**': OS Command Injection saldırılarında kullanılan '*whoami*', '*ls*' gibi komut enjeksiyon örüntülerini tespit eder.

- '**is_sqli**': SQL Injection saldırılarında kullanılan '*UNION*', '*SELECT*', '*DROP TABLE*' gibi SQL örüntülerini tespit eder.

Bu özellikler, ilgili saldırı türüne özgü karakteristik örüntüleri yakalayarak modelin saldırıları tanımasını kolaylaştırır. Bu özelliklerin sonuçları ikili (binary) halindedir, yani örüntü tespit edilirse 1, edilmezse 0 değerlerini alırlar.

Karakter Seviyesinde İstatistiksel Özellikler

- '**semicolon_count**': Noktalı virgül sayısı (*;*). Komut enjeksiyonu ve SQLi saldırılarında sık kullanılır.

- '**underscore_count**': Alt çizgi sayısı (_). Özel parametre isimlerinde ve kod karıştırma tekniklerinde kullanılır.

- '**equal_count**': Eşit işareti sayıs (=). Sorgu parametrelerinin ayrılmasında kullanılır, fazla sayıda olması saldırı göstergesi olabilir.

- '**questionmark_count**': Soru işareti sayısı (*?*). Sorgu başlangıcını gösterir, birden fazla olması anormal olabilir.

- '**and_count**': Ampersand sayısı (*&*). Sorgu parametrelerinin ayrılmasında kullanılır, fazla sayıda olması saldırı göstergesidir.

- '**or_count**': Boru işareti sayısı (|). Komut zincirlemede kullanılır, OS Command Injection saldırılarında sık görülür.

- '**dot_count**': Nokta sayısı (.). Dizin geçişlerinde ve dosya uzantılarında kullanılır, LFI saldırılarında fazla kullanılır.

- '**at_count**': At işareti sayisi (@). E-posta adreslerinde, SQLi saldırılarında ve bazı kod karıştırma tekniklerinde kullanılır.

- '**non_numeric**': Alfa-numerik olmayan karakter sayısı. Saldırı URL'lerinde normal kullanıcı trafiğine göre daha fazla özel karakter bulunur.

URL Yapısal Özellikleri

- '**subdir_count**': Alt dizin sayısı ('*/*' ile ayrılmış bölümler). Derin dizin yapıları LFI saldırılarında sık kullanılır.

- '**param_count**' Sorgu parametre sayısı ('*&*' ile ayrılmış). Fazla sayıda parametre kompleks saldırı göstergesi olabilir.

- '**has_extension**': Dosya uzantısı varlığı. Doğrudan dosya erişim girişimlerini gösterebilir.

- '**has_parameter**': Sorgu parametresi varlığı. Dinamik saldırı girişimlerinin çoğu parametre kullanır.

Bu özellikler, URL'nin organizasyonel yapısı hakkında bilgi verir ve normal kullanıcı trafiği ile saldırı trafiği arasındaki yapısal farkları ortaya çıkarır.

Karakter Dağılım Özellikleri

- '**total_digits_url**': URL'deki toplam rakam sayısı. Kod karıştırma tekniklerinde artar.

- '**total_letter_url**': URL'deki toplam harf sayısı. Normal ve saldırı trafiği arasında dağılım farklılıkları gösterir.

- '**total_digits_domain**': Alt dizin kısmındaki rakam sayısıdır.

- '**total_letter_domain**': Alt dizin kısmındaki harf sayısıdır.

- '**total_digits_path**': Yol kısmındaki rakam sayısıdır.

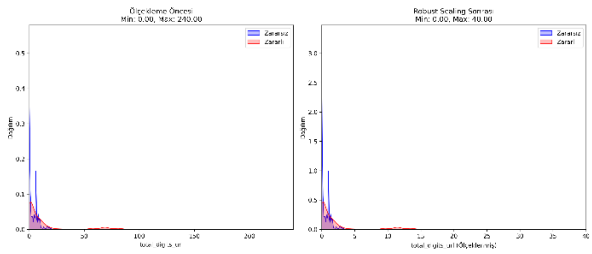
- '**total_letter_path**': Yol kısmındaki harf sayısıdır.

Bu özellikler, URL'nin farklı bölümlerindeki karakter dağılımını niceliksel olarak ölçerek anormal desenlerin tespitine yardımcı olmaktadır.

Veri Ölçekleme

Farklı özelliklerin farklı ölçeklerde olması sebebiyle bu tür verileri aynı ölçeğe getirme işlemi için

kullanılmaktadır [27, 28]. Veri ölçekleme işlemi ile elde edilen örnek bir sonuç Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Veri ölçekleme işlemi ile elde edilen sonuç.

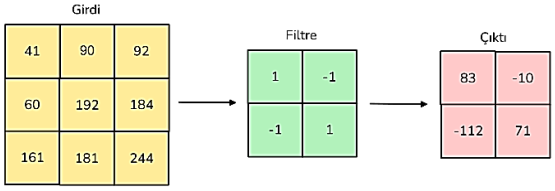
Çıkarılan özelliklerin değer aralıkları büyük farklılıklar göstermektedir. Örneğin, bazı özellikler [0 - 1] aralığında iken, bazı özellikler çok daha geniş aralıklara sahip olabilmektedir. Özelliklerin dağılımındaki bu değerler, derin öğrenme modellerinin eğitim sürecini olumsuz etkileyeceği için Robust Scaling yöntemi kullanılarak özellikler ölçeklendirilmiştir. Robust Scaling, medyan ve çeyrekler arası (interquartile - IQR) aralığını kullanarak verileri ölçekler ve uç değerlerin (outlier) etkisini azaltır. Bu yöntem, özellikle saldırı verilerinde sıkça karşılaşılan aşırı uç (anormal) değerlerin model performansını düşürmesini engeller. Bu çalışmada kullanılan Robust Scaling formülü Denklem (1)'de verilmiştir [28].

$$X_{ölçek} = X - \frac{Ortanca(X)}{IQR(X)} = \frac{X - Q_2}{Q_3 - Q_1} \quad (1)$$

Denklem 1'e göre, Q_1, 1. çeyrek değer (25. yüzdelik dilim), Q_3, 3. çeyrek değer (75. yüzdelik dilim), Q_2, ortanca değerini temsil etmektedir.
Ölçekleme sonrası değerler, orijinal dağılımın merkezi ve yayılımı hakkında bilgi korunarak istatistiksel ve örüntü tabanlı özelliklerin aynı ölçekte sunulması sağlanarak derin öğrenme modelinin daha kararlı ve doğru bir şekilde öğrenmesi mümkün kılınmıştır.

CNN

Verinin özelliklerini belirlemek için konvolüsyon ve havuzlama katmanlarını kullanmaktadır. Bu sayede özelliklerin hiyerarşik temsillerini verilerden otomatik olarak öğrenmektedir. Konvolüsyonel katman, özellik çıkarmak için kullanılmaktadır. Bu katmanda filtreler yer almaktadır. Filtreler kullanarak giriş verisini tarayarak belirli örüntüleri öğrenmektedir. Örneğin, bu çalışmada, web saldırılarında sık geçen kelime kombinasyonları veya karakter dizileri bu katmanda tanımlanmıştır. Kaydırma adımı belirlenerek verinin ne kadar detaylı işleneceği kontrol edilmiştir. Her filtre, veri üzerinden kayarak özellik haritaları oluşturmaktadır. Çekirdekteki değerler veri üzerinde kaydırılır ve değerler verinin değerleriyle çarpılmaktadır. Elde edilen değerler toplanmaktadır. Bu işlem, Şekil 3'teki gibi tüm veriye uygulanmaktadır.



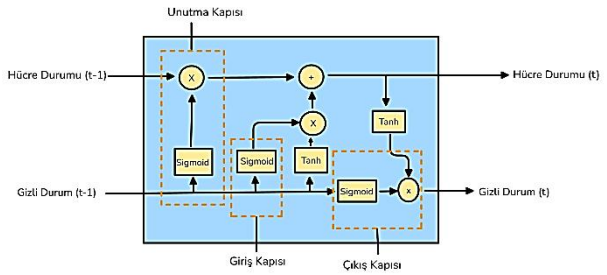
Şekil 3. Konvolüsyon katmanındaki filtreleme işlemi.

Aktivasyon fonksiyonu modelin doğrusal olmayan ilişkilerini öğrenmesini sağlar ve her konvolüsyon katmanından sonra aktivasyon işlemi uygulanmaktadır. Kullanılan aktivasyon fonksiyonu negatif değerleri sıfıra çekerek gradyan kaybolma problemini engellemektedir. Çıktı katmanında, saldırı tespitinde softmax/sigmoid fonksiyonu kullanılmaktadır. Bu, ağın daha karmaşık ve genel özellikler öğrenmesine yardımcı olmaktadır. Havuzlama katmanı, modelin daha genel özellikleri öğrenmesini sağlayarak aşırı öğrenmeyi önlemektedir. Bu çalışmada maksimum havuzlama(max pooling) yöntemi tercih edilmiştir. Bunun sebebi ise filtrelenen özellik haritalarından web saldırılarında en belirgin özniteliklerin seçilmesidir. Özellik haritalarının boyutunu küçültmek ve ağı daha da hızlandırmak için kullanılmaktadır. Böylece hesaplama maliyetini düşürerek, model genelleştirme kapasitesi arttırılmaktadır. Düzleştirme (flatten) katmanı, veriyi 1×1 haline getirmektedir. Böylece tam bağlı veri katmanının girişine hazırlanmış olur. Tam bağlı katmanlar, konvolüsyon katmanlarında çıkarılan özellikleri sınıflandırmak için işlem yapar. Düzleştirme işlemi ile özellik haritaları vektörleştirilir, dropout katmanı eklenerek aşırı öğrenme önlenmektedir. Son katmanda softmax aktivasyon fonksiyonu kullanılarak çıktılar saldırı veya norma istek olarak etiketlenmektedir. Evrişimli sinir ağlarının en önemli özelliği girdilerden otomatik olarak özellik çıkarabilmesidir. Fakat çok yoğun bir hesaplama işlemlerine sahiptir ve hiper-parametre ayarlamasına ihtiyaç duymaktadır [29].

LSTM

Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemi, ağdan hesaplanan hata değerinin gradyanlarını hesaplamaktadır, ardından ağırlıkları güncellemektedir. Geri yayılımlı bir YSA çıkış katmanından giriş katmanına kadar basit bir sinir ağında ağırlıkların güncellenmesinde sorun yaşanmayabilir, ancak derin bir sinir ağında gradyan kaybı veya gradyan patlaması ismi verilen sorunlarla karşılaşılabilmektedir [30]. Gradyan değerlerine geri dönüldüğünde, değerlerin üssel olarak küçülmesi ve bunun da gradyan kaybı sorununa neden olması veya üssel olarak daha büyük olması ve bunun da patlayan gradyan sorununa neden olması mümkündür. Bu sorunu önlemek için düzeltilmiş doğrusal birimini bir aktivasyon fonksiyonu olarak uygulamak çözümlerden birisidir. LSTM ağında zaman adımları mevcuttur ancak her adım için LSTM ağında "bellek" olarak adlandırılan ekstra bilgiler mevcuttur. Dolayısıyla LSTM hücresi sigmoid fonksiyonu içeren bir sinir ağında "unut kapısı (*f*)" ,"giriş kapısı (*I*)" ve "çıkış kapısı (*O*)", *tanh* fonksiyonlu bir sinir ağında "aday

katmanı ($\bar{C}$)", bir vektör olan "gizli durum (H)", bir vektör olan "Bellek durumu (C)" bileşenlerinden oluşmaktadır. Şekil 4'te, t zaman adımındaki LSTM ağı diyagramı verilmiştir.

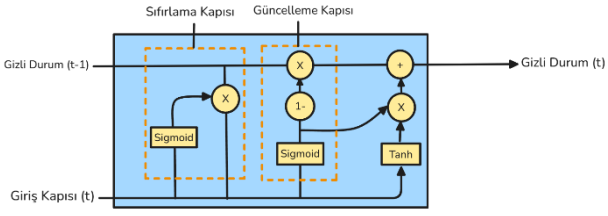


Şekil 4. t zaman adımındaki LSTM ağının genel yapısı.

Şekil 4'e göre, aday katman dışındaki ağlar sigmoid aktivasyon fonksiyonuna sahip tek katmanlı sinir ağlarıdır. Aday katman *tanh* fonksiyonuna sahip tek katmanlı sinir ağıdır. Bu kapılar önce U giriş vektörü ve önceki gizli durum vektörünü (W) alır, ardından bunları birleştirir ve aktivasyon fonksiyonunu uygular. Son olarak bu geçitler vektörler üretir.

GRU

Daha az tensör işlemine sahiptir, bu yüzden LSTM'den daha hızlı çalışmaktadır. LSTM'den farklı olarak, Şekil 5'te de görüldüğü gibi bilgi aktarmak için gizli katmanları kullanmaktadır. Güncelleme kapısı (update gate) ve resetleme kapısı (reset gate) olmak üzere iki kapıdan oluşmaktadır. Güncelleme kapısı, bilgilerin unutulup unutulmayacağına karar verir. Resetleme kapısı, ne kadar bilginin unutulacağına karar vermektedir [31].



Şekil 5. GRU çalışma mekanizması.

RNN

Zamana bağlı veya sıralı veri dizilerini işlemek için özel olarak tasarlanmış bir yapay sinir ağı türüdür. Bu ağlar, önceki girdilerden gelen bilgiyi hatırlayabilen döngüler oluşturarak bir tür hafızaya sahiptir. Bu özellik, dil modelleri, zaman serisi tahminleri ve metin üretimi gibi pek çok görev için idealdir. Ancak, RNN'lerin uzun süreli bağımlılıkları ele almakta zorlandığı bilinmektedir. Bu sorunlar genellikle "kaybolan gradyanlar" ve "patlayan gradyanlar" olarak adlandırılır ve eğitim sırasında karşılaşılabilmektedir. Kaybolan Gradyanlar Problemi, sinir ağlarının eğitimi sırasında gradyanların giderek küçülmesi veya kaybolması durumudur. RNN'ler, önceki zaman adımlarındaki bilgiyi koruyarak dizisel veriler üzerinde işlem yapmaktadır. Zaman İçinde Geriye Yayılım (Backpropagation Through Time - BPTT) algoritması ile eğitilmektedir. Uzun dizilerde, gradyanlar geriye doğru hesaplanırken giderek küçülmektedir. Küçülen gradyanlar, ağın erken katmanlarına ulaştığında nöron ağırlıklarını güncellemek için yetersiz hale gelmektedir. Sonuç olarak, ağ geçmiş bilgileri öğrenemez ve uzun süreli bağımlılıkları yakalayamamaktadır. Sigmoid, *tanh* gibi bazı aktivasyon fonksiyonları belirli aralıklarda gradyanları küçültmektedir. Bu tür aktivasyon fonksiyonları kaybolan gradyanlar problemine neden olmaktadır. Bu problemin üstesinden gelmek için çeşitli çözümler vardır. Doğrultulmuş Lineer Birim (Rectified Linear Unit - ReLU) aktivasyon fonksiyonu bu çözümlerden biridir ve bu çalışmada hesaplama açısından daha verimli olması, derin katmanlarda eğitim kolaylaşması sebepleriyle kullanılmıştır. RNN'lerde sigmoid veya tanh gibi klasik aktivasyon fonksiyonları kullanıldığında çıktı değerleri [-1, 1] veya [0, 1] aralığında kaldığı için gradyanlar küçülebilmektedir. ReLU, negatif değerleri sıfıra çeker ve pozitif değerleri olduğu gibi bırakır. Gradyanın sıfıra yaklaşmasını engelleyerek kaybolan gradyan problemini azaltmaktadır [32].

Geliştirilen DL Modellerinin Web Saldırı Tespitindeki Avantajları

Bu çalışmada geliştirilen 6 farklı DL modellerinin web saldırı tespitinde çeşitli avantajları vardır. CNN modelinin web sorgularında belirli karakter ve kelime öbeklerine dayalı kalıpları tespit etmedeki başarısı önemli bir avantajdır. SQLi, XSS gibi web saldırıları belirli karakter dizileriyle ortaya çıktığı için bu örüntüler CNN filtreleriyle kolaylıkla tespit edilebilmektedir. Bu çalışmada kullanılan diğer DL modeli olan LSTM modelinin uzun web sorgularındaki bağlam ilişkisini koruması ve zaman içinde gelen bilgiyi unutmaması kritik bir rol oynamaktadır. GRU, LSTM'e benzer şekilde sıralı verilerde başarılı tespit yapabilir, ancak daha az parametreye sahip olduğundan daha az hesaplama maliyeti ile daha hızlı eğitim süresi işlem yapmaktadır. RNN modeli temel sıralı model yapısında olması sebebiyle geçmiş girdileri dikkate almaktadır, fakat uzun dizilerde kaybolan gradyan problemi verebilmektedir. Bu çalışmada da karşılaştırmalı analiz yapabilmek için kullanılmıştır. CNN-LSTM hibrit modeli ile CNN ile özniteliklerin çıkarılması, LSTM ile sıralı analiz yaparak hem yerel saldırı örüntüleri hem de uzun vadeli bağlam tespit edilmiştir. DNN modeli ile yapay sinir ağı katmanları sayesinde yüksek doğrulukla web saldırı tespiti yapılabilmiştir.

Tarayıcı Eklentisi

Tarayıcı eklentisi, web tarayıcılarına ek işlevsellik kazandıran yazılım bileşenleridir. Kullanıcı deneyimini geliştirmek, güvenliği artırmak veya belirli görevleri otomatikleştirmek için geliştirilirler. Geliştirdiğimiz tarayıcı eklentisi, kullanıcıların internette daha güvenli

gezinmesini sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Bu eklenti, ziyaret edilen sayfanın URL'sini otomatik olarak alır ve değerlendirme için bir makine öğrenimi modeline iletir. Model, Jetson Nano üzerinde çalışan bir API'ye entegre edilmiştir ve aldığı URL'yi ön işleme sürecinden geçirerek belirli özellikleri çıkarır. Ardından, model bu URL'nin zararlı olup olmadığını sınıflandırır ve uygun bir yanıt üretir. Eğer model, sayfanın zararlı olduğunu tespit ederse, tarayıcı eklentisi otomatik olarak sayfanın içeriğini temizleyerek kullanıcıya bir uyarı mesajı gösterir. Böylece kötü amaçlı yazılımlar veya phishing saldırıları gibi tehditlerin önüne geçilir. Zararsız olarak sınıflandırılan sayfalar ise kullanıcı tarafından normal şekilde görüntülenebilir. Bu yöntem, gerçek zamanlı URL analizi yaparak dinamik ve etkili bir güvenlik katmanı sağlar.

Patlayan Gradyanlar Problemi, sinir ağlarının eğitimi sırasında gradyanlar belirli bir eşiğin üzerine çıkar ve bu da ağın aşırı derecede büyük güncellemeler yapmasına neden olur. Ağın öğrenme oranı çok yüksekse gradyanlar hızla büyüyebilmektedir. Bu sorunu çözmek için öğrenme oranı düşürülebilmektedir. Daha düşük bir öğrenme oranı, daha yavaş ve istikrarlı bir eğitim süreci sağlamaktadır. Bir diğer yöntem ise gradyanları belirli bir eşiğin altında veya üstünde tutmak için kısıtlamaktır. Bu, gradyanlar patlamasını önlemektedir.

Performans Değerlendirmesi

DL modelleme yöntemlerinden faydalanarak optimum matematiksel algoritma (lar)nın seçilebilmesi için geliştirilen her bir algoritmanın doğruluk ve güvenilirliği hesaplanacaktır. Bu çalışma kapsamında, sınıflandırma modelinin başarım değerlendirmesi için performans ölçütlerinden kesinlik, duyarlılık, F–ölçüsü, doğruluk metrikleri hesaplanacaktır. Bu metriklerin değerleri gerçek pozitif (TP), yanlış pozitif (FP), yanlış negatif (FN) ve karışıklık matrisindeki gerçek negatif (TN) değerleri kullanılarak Denklem 2–5'e göre hesaplanacaktır [33].

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

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

$$F1 = \frac{2TP}{2TP+FP+FN} \quad (4)$$

$$Doğruluk = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (5)$$

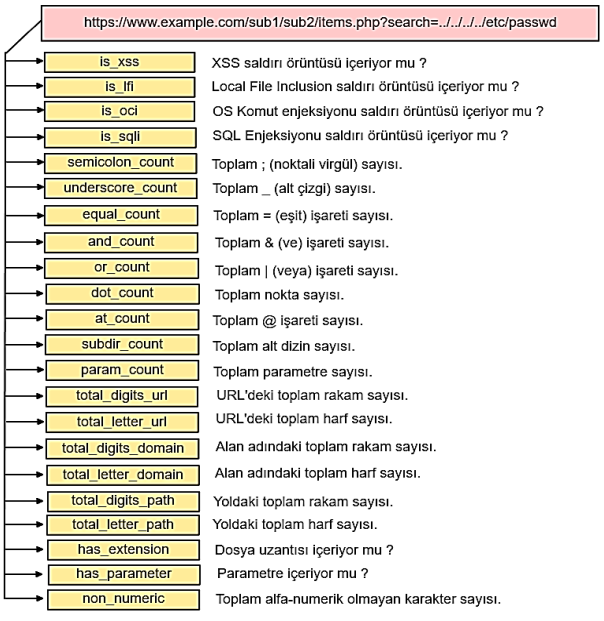
Çalışmanın sonucunda; DL algoritmaları, web uygulamalarında ortaya çıkabilecek çeşitli güvenlik tehditlerini tespit etme ve önleme konusunda kullanılabilecektir. Bu çalışma sayesinde, web uygulamasının normal çalışma davranışını analiz edebilir ve anormal aktiviteleri tespit edebilecektir. Bu, saldırı girişimlerini veya kullanıcı davranışında belirtilen potansiyel güvenlik sorunlarını tespit etmeye yardımcı olabilecektir. Ayrıca, web uygulamasına yönelik saldırıları otomatik olarak tespit edebilecek ve saldırıya karşı önlemler alabilecektir. Bu, güvenlik tehditlerinin hızlı bir şekilde tanımlanmasını ve müdahale edilmesini sağlayarak saldırıların etkisini azaltacaktır.

Web Uygulamasında Model Entegrasyonu

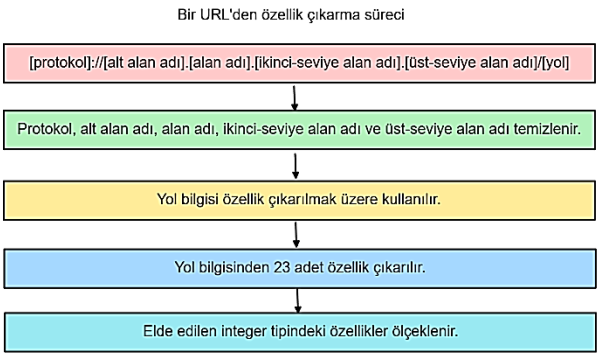
Bu çalışmada model geliştirmek için python dili ve scikit-learn, tensorflow ve keras kütüphaneleri kullanılmıştır. Grafikleri oluşturmak için matplotlib, seaborn ve plotly kütüphaneleri kullanılmıştır. Bu modeller NVIDIA Jetson Nano üzerinde çalıştırılmıştır. Jetson Nano, DLve yapay zeka uygulamalarını desteklemek üzere tasarlanmış güçlü bir cihazdır. Jetson Nano'nun küçük boyutu ve düşük güç tüketimi, yerleşik sistemlerde ve taşınabilir cihazlarda kullanımı kolaylaştırmaktadır. Flask ile bir API geliştirilmiş ve "AdminLTE" şeması kullanılarak oluşturulan web arayüzünde tahmin sonuçları gösterilmiştir [34]. Cihazlar üzerinde tarayıcı eklentisi ile URL bilgileri yakalanacak, sınıflandırılmak üzere ağdaki bulunan Jetson Nano üzerindeki API'ye gönderilecektir. Bu tahmin sonuçları da web arayüzünde gösterilecektir. Gelen her istek isteğe bağlı olarak bir bulut depolama biriminde veya jetson nano üzerinde tutulmuştur.

Deneysel Çalışmalar

FWAF veri seti "goodqueries.txt" ve "badqueries.txt" olmak üzere iki dosyadan oluşur. Bunların 44.662 adeti zararlı sorgu ve kalan 1.266,049 adeti zararsız sorgudur. Veri setlerini birleştirerek "label" isminde bir sütun ekliyoruz. Sorgu zararlı ise 1 zararsız ise 0 değerini veriyoruz. Daha sonra bu sorguları kullanarak özellik çıkarma işlemine geçiriyoruz. Çıkarılan özellikleri ve açıklamalarını Şekil 6'daki gibidir [35].



(a)



(b)

Şekil 6. Bir URL'den çıkarılan özellikler.

Tablo 1'e göre eğitim ve test veri setlerindeki Zararlı ve Zararsız etiketli sordu kayıtları verilmiştir.

Tablo 1. Veri seti.

	Zararsız	Zararlı
Eğitim Seti	1.139,389	40,196
Test Seti	126,600	4,466

Çalışmada kullanılan "goodqueries.txt" ve "badqueries.txt" dosyalarındaki veriler, sistematik bir şekilde seçilmiş ve etiketlenmiştir. Ancak, zararlı sorguların (badqueries) sayısının iyi niyetli sorgulara (goodqueries) kıyasla daha az olması veri dengesizliği sorununa yol açmıştır. Bu sorunu gidermek amacıyla sınıf ağırlıklandırması stratejisi uygulanarak kayıp fonksiyonuna sınıf ağırlıkları eklenmiştir. Bu çalışma için veri setindeki dengesizliği (zararlı/zararsız oranı 1:28.35) gidermek için karekök tabanlı ters frekans ağırlıklandırması uygulanmıştır [36]. Bu yöntem, standart ters frekans yönteminin çoğunluk sınıfını aşırı cezalandırma eğilimini yumuşatarak, azınlık sınıfını dengeli şekilde ön plana çıkarmaktadır. Ağırlıklar Denklem (6)'deki gibi yapılmıştır.

$$ağırlık_{sınıf}(i) = karekök\left(\frac{T}{2T_i}\right) \quad (6)$$

Denklem 6'ya göre T, eğitim setindeki toplam örnek sayısını bu çalışmadaki 1.179,585 değerini temsil etmektedir. T_i, i sınıfındaki örnek sayısını, ve karekök alma işlemi aşırı ağırlıklandırmayı önlemektedir. Bu çalışma için sınıflar için elde edilen ağırlıklar, Sınıf 0 (Zararsız): 0,72, Sınıf 1 (Zararlı): 3,83 olmuştur. Böylece, daha az sayıda verisi olan zararlı sorguların etkisini artırarak modelin bu sınıfı daha iyi öğrenmesi sağlanmıştır.

FWAF setindeki URL adreslerini zararlı ve zararsız olarak sınıflandırmak için bu adreslerden çeşitli özellikler çıkarılmıştır. Bu çalışmada web uygulamalarında zararlı sorguların tespit edilebilmesinde altı farklı DL modelleri için uygulanan optimum ince ayar değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

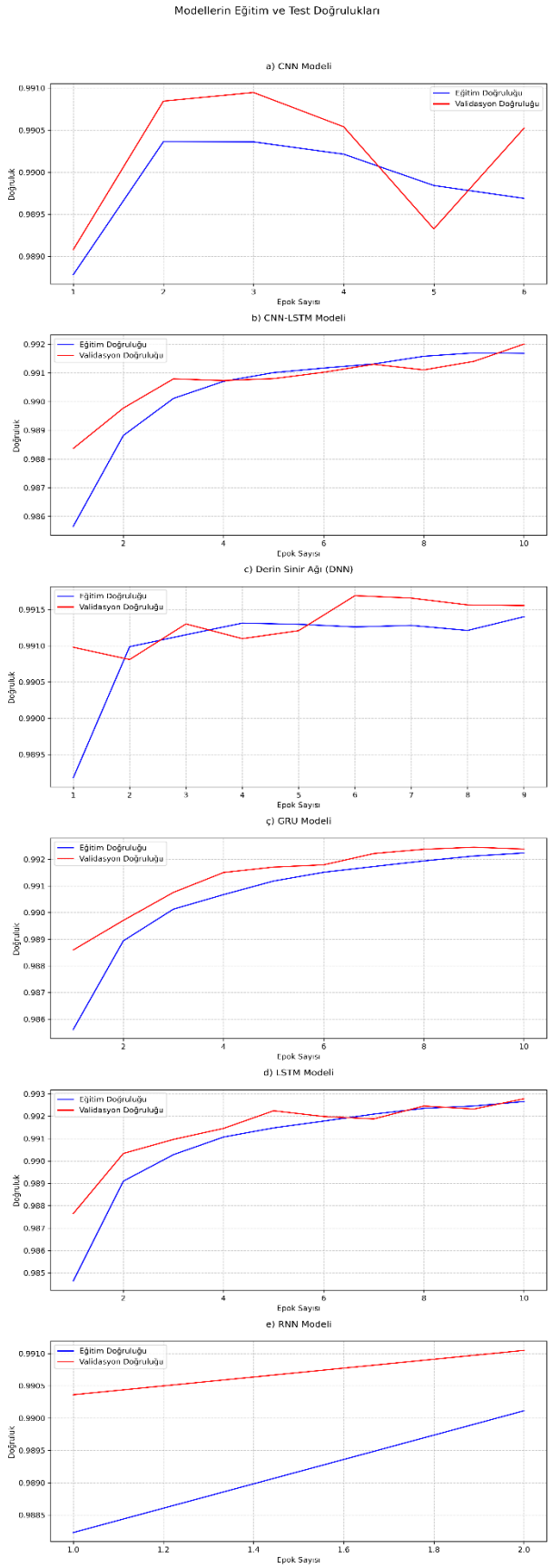
Tablo 2. Model ince ayar değerleri.

Model Adı	Batch Size	Optimizer	Öğrenme Katsayısı	Epok
CNN-LSTM	128	RMSprop	0,001	10
CNN	128	RMSprop	0,001	10
DNN	128	RMSprop	0,001	10
LSTM	128	Adam	0,001	10
GRU	128	RMSprop	0,001	10
RNN	128	RMSprop	0,001	2

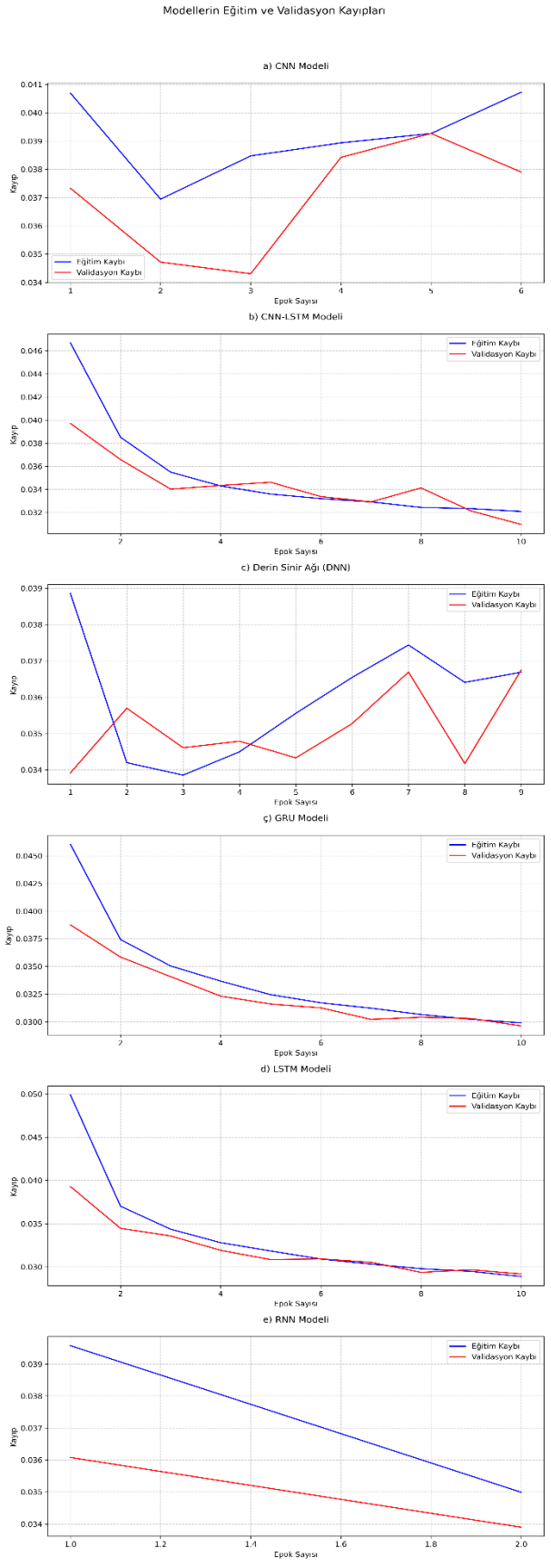
Çalışmada derin öğrenme modellerinin en uygun yapılandırmasını belirlemek amacıyla 'keras-tuner' kütüphanesi kullanılarak kapsamlı bir hiperparametre optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Modelin ağırlık güncelleme stratejisini belirleyen optimizasyon algoritması, öğrenme hızı, modelin tüm veri seti üzerinden kaç kez eğitileceği, her iterasyonda kullanılacak örnek sayısı olmak üzere dört krittik hiperparametre ile çalışılmıştır. Bu süreçte odak metrik olarak F1-skoru değerinin maksimizasyonu hedeflenmiştir. F1-skorunun tercih edilmesinin temel nedeni, dengesiz veri setlerinde model performansını daha bütüncül bir şekilde değerlendirebilmesidir. Çalışmada hiperparametre değerleri, modelin eğitim ve F1-skorları farklı deneylerle çeşitli değerlerle uygulanmıştır. Epok sayısı, erken durdurma göz önünde bulundurularak modelin aşırı öğrenmesini önleyecek biçimde bu değerler optimum değerler olarak seçilmiştir.

Model Değerlendirmesi

Bu çalışmada model eğitimi için Python dili ile birlikte "TensorFlow" kütüphanesi kullanılmıştır. Modeller, Ryzen 5 5600 işlemciye, 16 Gb RAM (Random Access Memory) ve RTX 3070 8 GB ekran kartına sahip bir bilgisayar üzerinde çalıştırılmıştır. Üç veri seti için de geliştirilen modeller Şekil 7'de verilmiştir. Veri seti dengesiz olduğu için başarı ölçütü olarak Doğruluk, Kesinlik, Duyarlılık, ve F1-skoru ölçütleri kullanılmıştır. Çalışmanın eğitim-validasyon kayıp grafikleri Şekil 8'de verilmiştir.

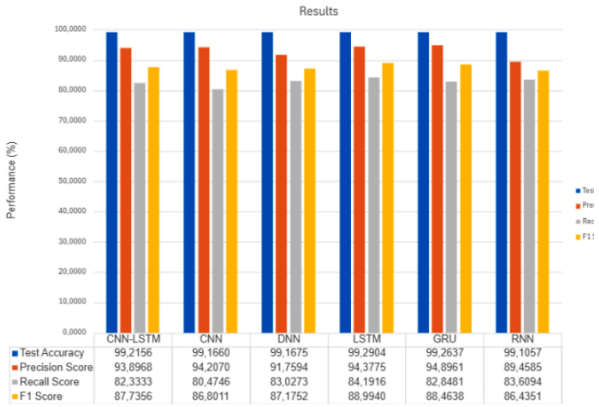


Şekil 7: DL modellerine ait eğitim - validasyon doğruluk eğrileri.



Şekil 8: DL modellerine ait eğitim - validasyon kayıp eğrileri

Şekil 8'de DL modellerine göre eğitim-validasyon kayıp eğrileri verilmiştir.



Şekil 9. Test Başarım Sonuçları

Tablo 3'te modellere göre eğitim ve test süreleri için geçen süre ile ilgili bilgi verilmiştir.

Tablo 3. Eğitim ve test sürelerinin karşılaştırılması.

Model Adı	Eğitim Süresi (sn)	Test Süresi (sn)
CNN	85,587	12,058
CNN-LSTM	586,473	13,455
DNN	454,114	10,654
GRU	1147,206	28,432
LSTM	1330,640	28,682
RNN	1732,097	45,619

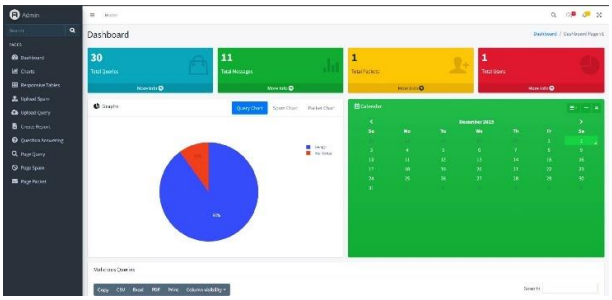
Şekil 7 ve Şekil 8'e göre, zararlı sorgu tespiti için eğitilen modellerin sonuçları verilmiştir. Şekil 9'a göre, LSTM modeli %99,29 test performansı, %94,7 hassasiyet performansı, %84,19 geri çağırma performansı, %88,99 F1-skoru elde edilmiştir. Tablo 3'e göre, 6 farklı model arasında en başarılı doğruluğu veren LSTM modelinin eğitim işlemi için 1331 saniye, test işlemi için ise 29 saniye gerekmiştir.

Web Uygulamasında Model Entegrasyonu

Zararlı web saldırı tespiti modelini gerçek zamanlı test etmek için bir tarayıcı eklentisi yazılmıştır. Kullanıcının girdiği her sayfayı yakalayıp eklentiye gönderilmektedir. Şekil 10'daki eklenti de API'ye adresi gönderip model tarafından sınıflandırılmaktadır.

Şekil 10. Modelin gerçek zamanlı çalıştırmak için yapılan işlemler.

Oluşturulan modelleri takip etmek ve sonuçları izlemek için "AdminLTE" şablonunu kullanılıştır. Şekil 11'e göre, AdminLTE açık kaynak kodlu yönetici panosu ve kontrol paneli temasıdır. Bu şablonu kullarak Flask kütüphanesi ile beraber bir web uygulaması geliştirilmiştir.



Şekil 11. Geliştirilen web uygulamasının ana sayfa ekranı.

Sonuç

Bu çalışmada, 6 farklı DL modeli ile web uygulamalarına yönelik siber saldırı tespit edilmesi modellenmiştir. Model seçimimiz Tablo 4'te verilen literatürdeki en başarılı yöntemlerle karşılaştırılmış ve test sonuçlarımız literatürdeki benzer çalışmalara kıyasla oldukça yüksek başarı oranları göstermiştir. Teknolojik ilerleme ve yapay zeka gelişimiyle birlikte artan tehdit ve saldırılar, bilgisayar sistemlerinin güvenliğini önemli bir şekilde etkilemektedir. Bu durum, güvelik duvarı uygulamalarının karmaşık ve dinamik tehditlere karşı yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Bu duruma çözüm olarak DL yöntemleri kullanarak kural tabanlı güvenlik yöntemlerine kalmadan bir savunma yapılacaktır. Bu işlem için ilk olarak veri seti temizlenmiş, elde edilen veriler ölçeklendirilmiştir. Daha sonra bu veri kullanılarak DL modelleri ile eğitilmiştir. Bu çalışmada 6 farklı DL modelleri arasında en başarılı saldırı tespiti LSTM yöntemi ile elde edilmiştir.

Tablo 4. Literatür ile bu çalışmanın sonuçların karşılaştırılması.

Çalışma	Veri Seti	Model	Başarı Oranı	Başlıca Katkı
[1]	SOREL-20M, EMBER-2018	CNN, AutoML	SOREL-20M: %99.8, EMBER: %98.4	AutoM+F3:F15L ile çevrimiçi kötü amaçlı yazılım tespiti; CNN kullanımı
[2]	Özgün Veri Kümesi (SQLi)	CNN-LSTM	%0.97 F1-skor	SQL enjeksiyon tespiti için CNN-LSTM hibriti; Web ve ağ tespiti
[3]	ISCX, CISC, CICDDoS	LSTM	DDoS: %97.57, XSS: %89.34	DDoS, XSS, SQL enjeksiyon tespiti için LSTM tabanlı model
[4]	ISCX-URL-2016	Rastgele Orman	İkili: %99.42, Çoklu: %95.68	URL tespiti; Rastgele Orman kullanımı
[5]	ISCX-URL-2016	LSTM, CNN	LSTM: %91, CNN: %95	Zararlı URL tespiti; LSTM ve CNN kullanımının karşılaştırılması
[6]	Özgün Veri Kümesi (URL)	Makine Öğrenimi	%96+	Kötü niyetli URL tespiti için makine öğrenimi teknikleri
[7]	Ulusal & Uluslararası Veri Setleri	RNN	%91+	Zararlı URL tespiti; RNN modeli kullanımı
[8]	Özgün Veri Kümesi (Phishing)	ANN (MLP)	%99.14	Phishing web siteleri sınıflandırması; MLP kullanımının başarı oranı
[9]	HTTPCSIC 2010	Sinir Ağları	90%	Web uygulama saldırı tespiti; 19 geleneksel makine öğrenimi tekniği ile değerlendirme
[12]	CSIC	LSTM + Word2Vec	%99.4 F1-skor	Web uygulamalarına yapılan saldırıları tespit için LSTM + Word2Vec kombinasyonu
[13]	Özgün Veri Kümesi	K-NN	%98.40	Firewall cihazı tespiti; K-NN yöntemi ile modelleme
[18]	Özgün Veri Kümesi	LSTM	Test: %99.29	Zararlı sorgu tespiti; LSTM modelinin yüksek başarı oranı
Bu çalışma	**FWAF veri seti**	**LSTM**	**Test %99.29 F1-skor: %88.99**	**Zararlı URL tespitinde 6 farklı Derin Öğrenme Modeli geliştirilmiştir.**

Çeşitli saldırı türlerine karşı modelin genelleme yeteneği değerlendirilmiş ve farklı derin öğrenme modelleri ile kıyaslamalar yapılmıştır. Eğitilen modeller, tarayıcı eklentisi uygulaması ile yakalanan web adreslerini sınıflandırmak üzere kullanılmıştır.

Zararlı sorgu tespiti gibi konularda tehdit türleri zamanla değişebilme potansiyeline karşı modelin periyodik olarak yeniden eğitilmesi gerekmektedir. Derin öğrenme tabanlı modellerin eğitilmesi ve anlamlı verinin çıkarılması sırasında yüksek hesaplama gücü gerektirebilmektedir. Gelecekte, çalışmamızda farklı veri setleri veya modeller ile ek karşılaştırmalar yapılarak modelimizin genelleme yeteneği daha iyi değerlendirilecektir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yazar Katkıları

1.ve 2. yazar DL algoritmaların tasarımına ve veri toplama sürecine katkıda bulunmuşlardır. 3, 4, ve 5. yazarlar metodoloji kısmını yazmış ve son düzeltmeleri gerçekleştirmiştir.

Teşekkür

Bu proje İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi BAP-2023-36 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Ayrıca bu çalışma TUBITAK 2209 - 1919B012322054 kodlu proje ile desteklenmiştir.

Kaynaklar

[1] A. Brown, M. Gupta, and M. Abdelsalam, "Automated machine learning for deep learning based malware detection," *Computers & Security*, vol. 137, p. 103582, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.cose.2023.103582.

[2] A. Paul, V. Sharma, and O. Olukoya, "SQL injection attack: Detection, prioritization & prevention," *Journal of Information Security and Applications*, vol. 85, p. 103871, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.jisa.2024.103871.

[3] B. Dawadi, B. Adhikari, and D. Srivastava, "Deep learning technique-enabled web application firewall for the detection of web attacks," *Sensors*, vol. 23, no. 4, p. 2073, Feb. 2023, doi: 10.3390/s23042073.

[4] K. Köksal, B. Doğan, and Z. A. Altıkardeş, "Topluluk sınıflandırıcı kullanarak zararlı url tespiti," *Veri Bilimi*, vol. *4, no.* 3, p. 113-122, 2021.

[5] E. Uçar, M. Ucar, and M. O. İncetaş, "A Deep learning approach for detection of malicious URLs," In *6th International Management Information Systems Conference*, p. 12-20, October, 2019.

[6] F. D. Abdi, and L. Wenjuan, "Malicious URL detection using convolutional neural network," *Journal*

International Journal of Computer Science, Engineering and Information Technology, vol. *7, no.* 6, p. 1-8, 2017.

[7] F. Tiryaki, Ü. Şentürk, and İ. Yücedağ, "Developing and evaluating an artificial intelligence model for malicious url detection," *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, vol.47, p.13-17, 2023.

[8] M. Moghimi and A. Y. Varjani, "New rule-based phishing detection method," *Expert Systems With Applications*, vol. 53, pp. 231–242, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.eswa.2016.01.028.

[9] M. Ismail, S. Alrabaee, K.-K. R. Choo, L. Ali, and S. Harous, "A comprehensive evaluation of machine learning algorithms for web application attack detection with knowledge graph integration," *Mobile Networks and Applications*, Jul. 2024, doi: 10.1007/s11036-024-02367-z.

[10] Ş. Bayrak, and B. Ardanuç, "Web uygulamaları için derin öğrenme yöntemiyle güvenlik duvarı uygulaması firewall application with the deep learning method for the web applications," *Sinyal İşlemeleri Uygulamaları Konferansı*, 1-5, 2022.

[11] K. Baysal, "Derin öğrenme temelli yeni nesil güvenlik duvarının tasarlanması", *Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Doktora Tezi, 2022.

[12] S. Toprak, and A. Yavuz, "Web application firewall based on anomaly detection using deep learning," *Acta Infologica*, vol. 0, no. 0, p. 0, Oct. 2022, doi: 10.26650/acin.1039042.

[13] S. Demir, Z. Aslan, "K-NN, NN ve feature selection yöntemleri ile firewall verilerinin sınıflandırması", *Anadolu Bil Meslek Yüksekokulu Dergisi*, vol. 17, no.66, pp.139-148, 2023.

[14] F. Demir, "Siber saldırı tespiti için makine öğrenmesi yöntemlerinin performanslarının incelenmesi," *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 23, no. 2, pp. 782–791, May 2021, doi: 10.25092/baunfbed.876338.

[15] M. Takaoğlu and Ç. Özer, "The effect of machine learning on intruson detectıon systems," *Uluslararası Yönetim Bilişim Sistemleri ve Bilgisayar Bilimleri Dergisi*, vol. 3, no. 1, pp. 11–22, Jun. 2019, doi: 10.33461/uybisbbd.558192.

[16] Einy, S. Makina öğrenmesile biyometrik sahtekarlığa ve ağ anormallik tespitine dayalı saldırı tespiti. *Sakarya Üniversitesi*, 2021.

[17] Y. E. Seyyar, A. G. Yavuz, and H. M. Unver, "Detection of web attacks using the BERT model," *2022 30th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, pp. 1–4, May 2022, doi: 10.1109/siu55565.2022.9864721.

[18] E. Baş, and A. A. Süzen, Web uygulama zafiyetlerinin keşfinde açıklanabilir yapay zekânın yeri. *All Science Proceeding*, 2023.

[19] I. Abasıkeleş-Turgut, and R. Daş, "Anomaly and intrusion detection systems for smart grids," *Elsevier*, 2024, pp. 231–270. doi: https://doi.org/10.1016/B978-0-443-14066-2.00005-0.

[20] R. S. Arslan, "FastTrafficAnalyzer: An efficient method for intrusion detection systems to analyze network traffic," *DÜMF Mühendislik Dergisi*, pp. 565–572, Sep. 2021, https://doi.org/10.24012/dumf.1001881.

[21] Y. Xu, Q. Zhang, H. Deng, Z. Liu, C. Yang, and Y. Fang, "Unknown web attack threat detection based on large language model," *Applied Soft Computing*, pp. 112905–112905,Feb.2025, https://doi.org/10.1016/j.asoc.2025.112905.

[22] Osama Salahat, Y. Assaf, and A. Younis, "Securing web applications using machine learning," *Najah.edu*, Feb.03,2025. https://repository.najah.edu/items/97bd9567-c9cd-4722-914e-4fba60c321c8

[23] T. Wang, Y. Xu, and Z. Tang, "Toward fast network intrusion detection for web services: partial-flow feature extraction and dataset construction," *International Journal of Web Information Systems*, Dec. 2024, doi: https://doi.org/10.1108/ijwis-09-2024-0261.

[24] R. Gallego, L. Pérez, Marcos Luengo Viñuela, and María Concepción Vega-Hernández, "Artificial intelligent web application firewall for advanced detection of web injection attacks," *Expert Systems*, Nov. 2023, doi: https://doi.org/10.1111/exsy.13505.

[25] L. Hickman, S. Thapa, L. Tay, M. Cao, and P. Srinivasan, "Text preprocessing for text mining in organizational research: review and recommendations," *Organizational Research Methods*, vol. 25, no. 1, pp. 114–146, Nov. 2020, doi: 10.1177/1094428120971683.

[26] C. P. Chai, "Comparison of text preprocessing methods," *Natural Language Engineering*, vol. 29, no. 3, pp. 509–553, Jun. 2022, doi: 10.1017/s1351324922000213.

[27] S. Feuerriegel *et al.*, "Using natural language processing to analyse text data in behavioural science," *Nature Reviews Psychology*, Jan. 2025, doi: 10.1038/s44159-024-00392-z.

[28] M. Ahsan, M. Mahmud, P. Saha, K. Gupta, and Z. Siddique, "Effect of data scaling methods on machine learning algorithms and model performance," *Technologies*, vol. 9, no. 3, p. 52, Jul. 2021, doi: 10.3390/technologies9030052..

[29] J. Barbero-Gómez, R. P. M. Cruz, J. S. Cardoso, P. A. Gutiérrez, and C. Hervás-Martínez, "CNN explanation methods for ordinal regression tasks," *Neurocomputing*,

p. 128878, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.neucom.2024.128878.

[30] S. Shao, "Enhancing sentiment analysis with a CNN-Stacked LSTM hybrid model," *ITM Web of Conferences*, vol. 70, p. 02002, Jan. 2025, doi: 10.1051/itmconf/20257002002.

[31] B. Ticona, F. Carranza, and V. Cotik, "Indigenous languages spoken in Argentina: a survey of NLP and speech resources," *arXiv (Cornell University)*, Jan. 2025, doi: 10.48550/arxiv.2501.09943.

[32] A. Dayan and A. Yilmaz, "Modelling the machines' language with natural language processing and machine learning algorithms," *DÜMF Mühendislik Dergisi*, Jul. 2022, doi: 10.24012/dumf.1131565.

[33] S. Bayrak, "Unveiling intrusions: explainable SVM approaches for addressing encrypted Wi-Fi traffic in UAV networks," *Knowledge and Information Systems*, vol. 66, no. 11, pp. 6675–6695, Jul. 2024, doi: https://doi.org/10.1007/s10115-024-02181-9.

[34] A. Almsaeed, (2018). AdminLTE control panel template. URl: https://almsaeedstudio. com/(visited on 17/4/2023).

[35] F. Ahmad, "GitHub - faizann24/Fwaf-Machine-Learning-driven-Web-Application-Firewall: Machine learning driven web application firewall to detect malicious queries with high accuracy.," *GitHub*. https://github.com/faizann24/Fwaf-Machine-Learning-driven-Web-Application Firewall?tab=readme-ov-file]

[36] P. Tufekci and E. Uzun, "Author detection by using different term weighting schemes," *2013 21st Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, pp. 1–4, Apr. 2013, doi: https://doi.org/10.1109/siu.2013.6531190.

Dicle University
Journal of Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/dumf
duje.dicle.edu.tr

Araştırma Makalesi / Research Article

K-medoids Kümeleme, Boosting ve BERT algoritmalarıyla Kredi Kartlarındaki Şüpheli Davranışların Tespit Edilmesi

Detection of Suspicious Behaviors in Credit Cards Using K-medoids Clustering, Boosting, and BERT Algorithms

Merve Pınar[1*], Ayşe Berna Altınel[2]

[1] Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, merve.pinar@marmara.edu.tr
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3041-6958

[2] Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, berna.altinel@marmara.edu.tr
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5544-0925

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 20 Şubat 2025
Revizyon 18 Nisan 2025
Kabul 24 Nisan 2025
Online 30 Haziran 2025

Anahtar Kelimeler:

Şüpheli Davranış Tespiti,
Dolandırıcılık Tespiti,
Boosting,
BERT,
K-medoids Kümeleme

ÖZ

Finansal dolandırıcılıkların giderek artan karmaşıklığı karşısında, kredi kartı işlemlerinde şüpheli davranışların erken ve doğru şekilde tespiti, güvenlik sistemleri açısından kritik bir gereksinim haline gelmiştir. Bu çalışmada, K-medoids tabanlı kümeleme ile denetimli sınıflandırma algoritmalarının entegrasyonundan oluşan hibrit bir model önerilmiştir. Model, veri kümesini alt gruplara ayırarak sınıflandırıcıların daha homojen örüntüler üzerinde eğitilmesini sağlamakta ve genel sınıflandırma başarımını artırmayı hedeflemektedir. Çalışma kapsamında, Avrupa'da gerçekleşmiş 284.807 işlemden oluşan, PCA dönüşümleriyle anonimleştirilmiş bir kredi kartı veri seti kullanılmıştır. Eğitim verisi oranları %30, %40 ve %80 olarak belirlenmiş ve bu oranların model başarımı üzerindeki etkisi sistematik olarak incelenmiştir. K-medoids kümelenmiş veri üzerinde Lojistik Regresyon, Destek Vektör Makineleri, Yapay Sinir Ağları, Rastgele Orman, XGBoost, Gradyan Artırma, Hard/Soft Voting Ensemble ve BERT tabanlı modeller (BERT, XML-RoBERTa, DistilBERT, Electra) çalıştırılmıştır. Ayrıca, filtre tabanlı Bilgi Kazancı, Fisher Skor ve Ki-kare özellik seçimi tekniklerinin algoritma performansları üzerindeki etkisi detaylı şekilde analiz edilmiştir. Deneysel sonuçlar, özellikle Gradyan Artırma algoritmasının %98.26 F1 skoruna ulaşarak en yüksek başarıyı elde ettiğini göstermiştir. Bilgi Kazancı ve Fisher Skor yöntemleri sınıflar arası ayrımı daha etkili biçimde modelleyerek sınıflandırma performansını artırırken, Ki-kare yöntemi, veri setinin sürekli ve dönüşümlü doğası nedeniyle daha düşük doğruluk oranlarına ulaşmıştır. Elde edilen bulgular, kümeleme destekli hibrit sınıflandırma yaklaşımlarının, dengesiz dağılımlı yüksek boyutlu veri setleri üzerinde yüksek doğruluk ve genellenebilirlik sunduğunu ortaya koymakta ve sahtekarlık tespitine yönelik karar destek sistemlerinin geliştirilmesinde etkin bir çerçeve sunmaktadır.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 20 February 2025
Received in revised form 18 April 2025
Accepted 24 April 2025
Available online 30 June 2025

Keywords:

Suspicious Behavior Detection,
Fraud Detection,
Boosting,
BERT,
K-medoids Clustering

DOI: 10.24012/dumf.1643370

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

The increasing complexity of financial fraud necessitates the early and accurate detection of suspicious behaviors in credit card transactions for robust financial security systems. In this study, a hybrid model integrating K-medoids-based unsupervised clustering with various supervised classification algorithms is proposed. The model partitions the dataset into subgroups to enable classifiers to learn from more homogeneous patterns, thereby enhancing the overall classification performance. The experimental setup utilizes a publicly available credit card dataset comprising 284,807 anonymized transactions collected from Europe, where feature anonymization is achieved through Principal Component Analysis (PCA). The impact of different training-to-test splits (30%, 40%, and 80%) on model performance is systematically evaluated. On the clustered data, a diverse set of classification models is applied, including Logistic Regression, Support Vector Machines, Artificial Neural Networks, Random Forest, XGBoost, Gradient Boosting, Hard and Soft Voting Ensembles, as well as BERT-based transformer models (BERT, XML-RoBERTa, DistilBERT, Electra). In addition, three supervised filter-based feature selection methods—Information Gain, Fisher Score, and Chi-Squared—are employed to assess their effects on classification performance. The experimental results indicate that the Gradient Boosting algorithm achieves the highest F1 score, reaching up to 98.26%, especially when combined with Fisher Score-based feature selection. Both Information Gain and Fisher Score techniques significantly enhance the classification performance by capturing inter-class discriminative power. However, the Chi-Squared method exhibits comparatively lower effectiveness due to its incompatibility with the transformed and continuous nature of the dataset. Overall, the findings demonstrate that clustering-assisted hybrid classification architectures provide superior accuracy and generalizability in high-dimensional, imbalanced datasets and offer a promising framework for developing intelligent fraud detection systems.

Giriş

Finansal kayıpların önlenmesi ve güvenlik açıklarının minimize edilmesi, kredi kartı dolandırıcılığının erken ve doğru tespitini zorunlu hale getirmiştir. Dijital ekonominin hızla büyümesiyle birlikte dolandırıcılık vakalarının artışı, kredi kartı işlemlerinde şüpheli davranışların belirlenmesini kritik bir araştırma alanına dönüştürmüştür. Geleneksel kural tabanlı yöntemler, yeni nesil dolandırıcılık tekniklerine karşı yetersiz kalırken, Makine Öğrenmesi (MÖ) (Machine Learning (ML)) tabanlı yaklaşımlar, büyük ölçekli işlem verilerinden örüntüleri öğrenerek dolandırıcılık faaliyetlerini daha etkin bir şekilde tespit edebilme potansiyeline sahiptir.

MÖ tekniklerinin dolandırıcılık tespit sistemlerine entegrasyonu, dolandırıcılık faaliyetlerinin belirlenmesinde doğruluğu ve operasyonel verimliliği artırabilir. Kredi kartı işlem veri kümelerinin dengesiz dağılımı ve dolandırıcıların sürekli gelişen taktikleri, dolandırıcılık tespit sistemleri için önemli zorluklar oluşturmaktadır. Çeşitli araştırmalarda, bu tür zorlukların üstesinden gelmek ve dolandırıcılığı daha etkin bir şekilde tespit edebilmek amacıyla hem denetimli hem de denetimsiz öğrenme yöntemlerini içeren farklı MÖ yaklaşımları incelenmiştir. Bu çalışmalar, özellikle dengesiz veri kümeleri üzerinde algoritmaların başarımını artırmaya yönelik stratejiler geliştirerek, dolandırıcılık faaliyetlerinin daha yüksek doğrulukla belirlenmesini sağlamaya odaklanmıştır.

MÖ teknikleri genel olarak denetimli ve denetimsiz öğrenme yöntemleri olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Denetimli öğrenme, geçmiş verilere dayalı olarak geçerli ve hileli işlemleri ayırt edebilen modellerin, etiketli veri kümeleri üzerinde eğitilmesini içerir. Karar Ağaçları (KA) (Decision Trees (DT)), Rastgele Orman (RO) (Random Forest (RF)) ve Destek Vektör Makineleri (DVM) (Support Vector Machines (SVM)) gibi yaygın algoritmalar, dolandırıcılık tespiti görevlerinde yüksek doğruluk oranları elde etme konusunda etkili olduğu gösterilen yöntemler arasındadır [1]. Özellikle Yapay Sinir Ağları (YSA) (Artificial Neural Networks (ANN)) tabanlı modellerin, kredi kartı dolandırıcılığı tespitinde önemli başarılar sağladığı ve bu alandaki denetimli öğrenme yaklaşımlarının yüksek potansiyele sahip olduğu belirtilmektedir [2].

Denetimsiz öğrenme yöntemleri, etiketli verinin sınırlı olduğu durumlarda tercih edilmekte olup, genellikle işlem verileri içerisindeki anormal ya da sıra dışı kalıpları belirlemeye odaklanmaktadır. K-ortalama kümeleme, Lokal Aykırılık Faktörü ve İzolasyon Ormanı (İO) (Isolation Forest (IF)) gibi yöntemler, kredi kartı işlemlerinde olağandışı davranışları tespit etmek amacıyla kullanılmaktadır [3]. Bu yöntemler, dolandırıcılık işlemlerini istatistiksel olarak aykırı noktalar şeklinde ele alarak tespit sürecinin etkinliğini artırmayı hedeflemektedir [4]. Denetimli ve denetimsiz öğrenme tekniklerinin bir arada kullanılması, dolandırıcılık tespitinde daha yüksek başarı oranlarına ulaşılmasını sağlayarak, farklı yöntemlerin eksikliklerini tamamlayıcı bir yaklaşımla gidermesine olanak tanımaktadır.

Mohsen, Nassreddine ve Massoud, kredi kartı dolandırıcılığının tespitinde MÖ tekniklerinin etkinliğini değerlendirmiştir. Çalışmada, Lojistik Regresyon (LR) (Logistic Regression), YSA ve DVM gibi sınıflandırma tekniklerinin yanı sıra, topluluk öğrenme yöntemlerinden RO algoritması kullanılmıştır. Farklı MÖ yöntemlerinin doğruluk oranları karşılaştırılarak, kredi kartı dolandırıcılığının tespiti için en uygun modelin belirlenmesi amaçlanmıştır [5].

Oketola ve arkadaşları, çevrimiçi işlemlerin artmasıyla birlikte kredi kartı dolandırıcılığının nasıl evrildiğini incelemiş ve bu bağlamda denetimli ve denetimsiz makine öğrenmesi yöntemlerini değerlendirmiştir. Çalışmada, LR, KA, RO, K-En Yakın Komşu (K-EYK) (K-Nearest Neighbors (KNN)), DVM ve Naive Bayes (NB) gibi sınıflandırma tekniklerinin yanı sıra, K-ortalama kümeleme yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca, hibrit yöntemler de incelenmiş ve modellerin performansları doğruluk, kesinlik, duyarlılık, F1 skor, ROC ve AUC gibi değerlendirme ölçütleri açısından karşılaştırılmıştır [6].

Muameleci, Avrupa'daki bir aylık kredi kartı işlemlerinden oluşan bir veri kümesinde anomali tespiti amacıyla Çok Değişkenli Genelleştirilmiş Pareto Dağılımı (ÇDGPD) (Multivariate Generalized Pareto Distribution (MGPD)) yönteminin performansını incelemiştir. Çalışmada, ÇDGPD' nin performansı, denetimli bir makine öğrenme algoritması olan Tam Bağlantılı Konvolüsyonel Sinir Ağı (TBKSA) (Fully Connected Convolutional Neural Networks (FFCNN)) ile denetimsiz algoritmalar olan İO ve DVM ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, ÇDGPD' nin İO ve DVM'ye kıyasla bazı durumlarda daha iyi performans gösterdiğini, ancak en yüksek başarı oranının TBKSA modeli tarafından elde edildiğini ortaya koymuştur [7].

Awoyemi ve arkadaşları, yüksek derecede dengesiz kredi kartı dolandırıcılığı verisi üzerinde NB, K-EYK ve LR algoritmalarının performansını incelemiştir. Çalışmada, veri dengesizliğini gidermek amacıyla alttan ve üstten örnekleme tekniklerinin birlikte kullanıldığı hibrit yöntemler uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, K-EYK algoritmasının diğer yöntemlere kıyasla en iyi performansı gösterdiğini ortaya koymuştur [8].

Hussein ve arkadaşları, bulanık kaba en yakın komşu yöntemi ile lojistik regresyonu birleştiren hibrit bir model önermiş ve topluluk yöntemlerinin tespit doğruluğunu artırma potansiyelini ortaya koymuştur [9]. Benzer şekilde, Setiawan ve arkadaşları, LR ile KA yöntemlerini karşılaştırmış ve her iki tekniğin de etkili olduğunu, ancak performanslarının veri kümesinin özelliklerine ve mevcut dolandırıcılık desenlerine bağlı olarak değişkenlik gösterdiğini belirlemiştir [10].

Alarfaj ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada, KA, RO, DVM, LR ve Konvolüsyonel Sinir Ağı (KSA) (Convolutional Neural Network (CNN)) gibi yöntemleri değerlendirilmiş, KSA modelinin doğruluk %99.9, F1 skoru %85.71, kesinlik %93 ve AUC %98 açısından üstün performans gösterdiği bulunmuştur. Sonuçlar, derin öğrenme modellerinin dolandırıcılık tespitinde daha başarılı olduğunu ve katman sayısının artırılmasının doğruluğu iyileştirdiğini göstermektedir [11].

Varmedja ve arkadaşları, kredi kartı dolandırıcılığının tespitinde farklı MÖ algoritmalarının performansını karşılaştırmıştır. Çalışmada, LR, RO, NB ve Çok Katmanlı Algılayıcı (ÇKA) (Multilayer Perceptron (MLP)) algoritmaları değerlendirilmiş, dengesiz veri yapısını dengelemek için Sentetik Azınlık Aşırı Örnekleme Tekniği (SAAÖT) (Synthetic Minority Over-sampling Technique (SMOTE)) kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre, RO algoritması %99.96 doğruluk, %96.38 kesinlik ve %81.63 duyarlılık ile en iyi performansı göstermiştir. Ayrıca, uygun veri ön işleme ve örnekleme teknikleri kullanıldığında geleneksel MÖ algoritmalarının, derin öğrenme yöntemleriyle benzer doğruluk seviyelerine ulaşabileceği ortaya konmuştur

Yapılan çalışmalar, kredi kartı dolandırıcılığının tespitinde farklı MÖ ve derin öğrenme yöntemlerinin etkinliğini ortaya koymuş ve veri dengesizliği gibi sorunların giderilmesiyle model performansının iyileştirilebileceğini göstermiştir. Bu doğrultuda, mevcut yaklaşımların yanı sıra, yeni yöntemlerin entegrasyonu ve hibrit modellerin kullanımı dolandırıcılık tespitinin doğruluğunu artırma potansiyeline sahiptir. Bu çalışmada, kredi kartı dolandırıcılığının tespitine yönelik çeşitli MÖ teknikleri kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve özellikle K-medoids kümeleme yöntemi ile Boosting ve BERT tabanlı sınıflandırma algoritmalarının entegrasyonu analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında, denetimli ve denetimsiz öğrenme yöntemlerinin hibrit bir yapıda birleştirilmesiyle dolandırıcılık tespitinde daha yüksek başarı oranına sahip bir model geliştirilmiştir. Farklı eğitim-test oranlarında gerçekleştirilen deneysel analizler sonucunda, LR, YSA, DVM, RO, XGBoost, Gradyan Artırma (GA) (Gradient Boosting (GB)), Hard ve Soft Voting Topluluk yöntemleri, Minkowski-K-EYK ve BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) gibi algoritmaların performansı değerlendirilmiştir. Algoritmaların başarımı, doğruluk ve F1 skoru metrikleri üzerinden karşılaştırılmıştır. K-medoids kümeleme, Boosting tabanlı modeller ve BERT ile entegre edilerek hibrit olarak geliştirilen bu yöntemde F1 skoru ve doğrulukla değerlendirilen modeller arasında GA algoritması tüm senaryolarda en yüksek F1 skorunu elde ederek en başarılı yöntem olmuştur.

Elde edilen sonuçlar, dolandırıcılık tespiti alanında daha yüksek doğruluk oranlarına ulaşmak için hibrit yaklaşımların etkili bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Bu doğrultuda geliştirilen yöntemlerin, gerçek zamanlı finansal güvenlik sistemlerinde uygulanabilirliği artırarak, kredi kartı dolandırıcılığıyla mücadelede önemli katkılar sağlaması hedeflenmektedir.

Materyal ve Metot

Çalışmada, Avrupa'daki kredi kartı işlemlerinden oluşan, anonimleştirilmiş 284.807 kayıt içeren bir veri seti kullanılmıştır. Kümeleme ve sınıflandırma teknikleri birlikte kullanılarak hibrit bir yaklaşım benimsenmiş ve modelin başarımını artırmaya yönelik çeşitli optimizasyon yöntemleri uygulanmıştır. Öncelikle, K-medoids kümeleme algoritması ile veri setindeki benzer işlem grupları belirlenmiş, ardından sınıflandırma algoritmaları kullanılarak dolandırıcılık tespit süreci gerçekleştirilmiştir. Veri setine uygulanan ön işleme adımlarının ardından, K-medoids kümeleme yöntemi ile veri gruplandırılmış; her bir küme üzerinde çeşitli sınıflandırma algoritmaları çalıştırılmış ve elde edilen sonuçlar doğruluk ve F1 skoru gibi metriklerle değerlendirilmiştir.

Özellik Çıkarımı Yöntemleri

Özellik mühendisliği, doğru özelliklerin seçilmesi yoluyla modelin performansını önemli ölçüde artırabileceği, karmaşıklığını azaltabileceği ve yorumlanmasını kolaylaştırabileceği için, makine öğrenimi sürecinde kritik bir adımdır. Bu bağlamda, özellik seçimi teknikleri orijinal özellikleri dönüştürmek yerine, bu özelliklerin en anlamlı alt kümesini seçmeye odaklanır. Seçilen bu alt küme, genellikle hem modelin hesaplama süresini ve karmaşıklığını azaltır hem de modelin tahmin gücünü ve sınıflandırma başarımını artırabilir. Başka bir deyişle, özellik seçimi; en alakalı ve öngörü gücü yüksek özellikleri belirleyerek, modelin yeni ve görülmemiş veriler üzerindeki doğruluğunu iyileştirmeye katkı sağlayabilir [12].

Bilgi Kazancı

Bilgi Kazancı (BK) (Information-Gain (IG)) tekniği, entropiyi kullanarak özellik mühendisliği yapmaktadır. Entropi, sistemdeki düzensizliği ölçen bir kavramdır. Dolayısıyla BK özellik çıkarım tekniği de veri kümesindeki özellikler için her bir kategori bazında bilgi kazanım oranını ölçerek özellik mühendisliği yapmaktadır ve denklemi (1) şöyledir [13]:

$$\text{Bilgi Kazancı} = \text{Entropi (Sınıf)} - \text{Entropi (Sınıf / Özellik)} \quad (1)$$

Fisher Skor

Fisher Skor (FS), FS fonksiyonu aracılığıyla, veri kümesindeki sınıflar arasında en yüksek ayrım gücüne sahip öznitelikleri seçmeyi amaçlayan bir özellik seçimi yöntemidir. FS özellik çıkarımının hesaplama yaptığı formül Denklem 2'de verilmektedir [14]:

$$F(x_i) = \frac{\left|\mu_i^k - \mu_i^j\right|}{\alpha_i^k - \alpha_i^j} \quad (2)$$

Burada, **k** sembolü veri kümesindeki sınıflardan birini ve **j** sembolü de veri kümesindeki diğer sınıfı; $\boldsymbol{\alpha_i^+}$ ve $\boldsymbol{\alpha_i^-}$ değerleri de bu sınıfları standart sapma değerlerini ve μ_i^k ve μ_i^j değerleri yine bu sınıfların aritmetik ortalamalarını göstermektedir. FS özellik çıkarım yöntemi, özelliklerin sıralamasını fisher puanına göre azalan sırada döndürür ve daha sonrasında özellikler istenilen sayıda seçilebilir.

Ki-Kare

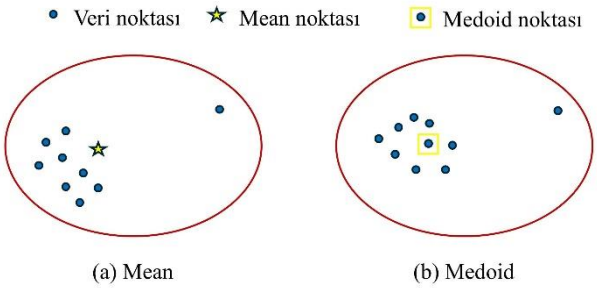
Ki-kare (Chi-Squared) özellik çıkarımı tekniği oldukça yaygın olarak kullanılan ve istatistiksel olarak anlamlılık hesaplaması yapan bir özellik seçim yöntemidir. Bu özellik çıkarımı tekniği, genellikle birbirinden bağımsız iki değer arasında niteliksel olarak ne ölçüde bir bağlantı olup olmadığını ölçen Ki-kare isimli bir teste dayanmaktadır [15]. Her özellik için Ki-kareyi hesaplar ve en iyi Ki-kare puanlarına sahip istenilen sayıda özelliği seçer. Ki-karenin gerçekçi bir hesaplama yapabilmesi için değişkenler kategorik olmalı ve bağımsız olarak örneklenmelidir.

Bu çalışmamızda denetimli özellik seçimi yöntemlerinden BK, FS ve Ki-kare teknikleri ile denetimsiz özellik seçimi yöntemlerinden PCA tekniği kullanıldı. Özellik seçimi yöntemleri veri kümesi üzerinde kullanıldıktan sonra ayrı ayrı, K-medoids+LR, K-medoids+DVM, K-medoids+TSA, K-medoids+BERT, K-medoids+Minkowski-K-EYK, K-medoids+RO, K-medoids+HV-Ensemble, K-medoids+SV-Ensemble, K-medoids+XGBoost ve K-medoids+GA algoritmaları çalıştırılarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

Kümeleme Algoritmaları

Kümeleme, bir nesne veya örnek setini gruplama süreci olarak tanımlanabilir. Bu sürecin temel amacı, aynı küme içerisindeki nesnelerin birbirine benzer özellikler göstermesi, ancak farklı kümelerde yer alan nesnelerden belirgin şekilde ayrışmasıdır [16]. Kümeleme yöntemleri genel olarak hiyerarşik ve hiyerarşik olmayan yaklaşımlar olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Hiyerarşik olmayan kümeleme algoritmaları arasında en yaygın kullanılanlar, K-ortalama (K-means) ve medoid merkezli kümeleme (K-medoids) algoritmalarıdır. (Şekil 1).

K-ortalama algoritması, küme sayısı kadar merkez noktası belirleyerek, kümedeki örneklerin koordinatlarını kullanarak yinelemeli bir şekilde bu merkezleri güncellemekte ve her nesneyi en yakın merkez noktasına atamaktadır. Buna karşılık, K-medoids algoritması, kümedeki nesnelerin koordinatlarının ortalamasını almak yerine, kümenin ortalamasına en yakın olan bir nesneyi merkez olarak seçmekte ve bu nesneyi kümenin temsili merkezi olarak kabul etmektedir [17]. Bu iki algoritma arasındaki temel farklar dikkate alındığında, K-ortalama algoritmasının düşük hesaplama karmaşıklığına sahip olması ve kolay uygulanabilirliği avantaj sağlarken, K-medoids algoritmasının aykırı değerler karşısında daha dayanıklı olduğu ve bazı veri kümelerinde daha yüksek performans gösterebildiği belirtilmektedir [18].



Şekil 1. K-ortalama ve K-medoids kümeleme yöntemleri arasındaki farkın grafiksel gösterimi [19]

Sınıflandırma Algoritmaları

Lojistik Regresyon

LR, bağımlı değişkenin kategorik olduğu durumlar için kullanılan istatistiksel bir sınıflandırma algoritmasıdır. Özellikle ikili sınıflandırma problemlerinde yaygın olarak tercih edilen bu yöntem, bir olayın gerçekleşme olasılığını tahmin etmek için sigmoid fonksiyonundan yararlanmaktadır. Model, giriş değişkenleri ile hedef değişken arasındaki ilişkiyi doğrusal bir fonksiyon üzerinden kurmakta ve çıktı değerlerini 0 ile 1 arasında bir olasılık şeklinde üretmektedir [20]. Hesaplama verimliliği ve yorumlanabilirliği sayesinde istatistiksel analizlerde ve MÖ uygulamalarında tercih edilmekte olup, bankacılıkta kredi değerlendirme süreçlerinde de yaygın olarak kullanılmaktadır.

Destek Vektör Makineleri

DVM, öncelikli olarak sınıflandırma problemlerinde kullanılan bir MÖ algoritmasıdır. Temel prensibi, veri örneklerini ayrıştırarak sınıflandırmak ve sınıflar arasındaki en iyi ayrımı sağlayan hiper düzlemi belirlemektir. Bu ayrım çizgisi marjin olarak adlandırılmakta olup, sınırın her iki tarafında yer alan ve en yakın veri noktalarını temsil eden destek vektörleri ile belirlenmektedir. DVM, doğrusal olmayan veri setlerinde çekirdek fonksiyonları kullanarak veriyi daha yüksek boyutlu uzaylara dönüştürmekte ve böylece doğrusal olmayan veri dağılımlarında da etkili bir sınıflandırma gerçekleştirebilmektedir. Ancak, düşük boyutlu veri setlerinde başarılı sonuçlar vermesine karşın, büyük ölçekli veri setlerinde yüksek hesaplama maliyeti nedeniyle işlem süresi önemli ölçüde artabilmektedir.

Tekrarlayan Sinir Ağları

Tekrarlayan Sinir Ağları (TSA) (Recurrent Neural Network (RNN)), özellikle sıralı verilerin işlenmesine yönelik geliştirilen güçlü bir sinir ağı mimarisi olarak öne çıkmaktadır. Sahip olduğu geri besleme mekanizması, geçmiş bilginin depolanmasına ve mevcut hesaplamalara dahil edilmesine olanak tanıyarak, doğal dil işleme (DDİ) (Natural Language Processing (NLP)), konuşma tanıma ve zaman serisi tahmini gibi zamana bağlı veri içeren görevlerde yüksek performans sergilemesini sağlamaktadır [21].

$$h_t = \tanh\left(W_{hh}h_{t-1} + W_{xh}x_t\right) \quad (3)$$

Denklem 3'te W ağırlık, h gizli katman, W_{hh} bir önceki gizli katman ağırlığı, W_{hx} mevcut gizli katman ağırlığı ve *tanh* aktivasyon fonksiyonunu temsil etmektedir.

BERT

BERT, Google tarafından geliştirilen ve DDİ amacıyla kullanılan bir MÖ modelidir. BERT, kelimeleri yalnızca bağımsız olarak değerlendirmek yerine, cümleyi bütünsel olarak analiz ederek bağlam içindeki anlamlarını belirlemektedir. Cümle içindeki belirli kelimelere odaklanmaksızın tüm cümleyi dikkate alarak yorumlama yapar ve elde ettiği anlam doğrultusunda arama sonuçlarını oluşturur. Bu nedenle, cümle yapısının düzeni ve kelimelerin uyumu, modelin beklenen doğrulukla çalışabilmesi açısından önemlidir [22].

BERT, kelimeleri bireysel veya gruplar halinde incelemek yerine, cümlenin tamamını ele alıp yorumlamakta ve çıkarımlarını bu bütüncül analiz doğrultusunda yapmaktadır. Bu nedenle, BERT'in girdi olarak aldığı cümlenin düzeni, kelimelerin sıralaması ve birbirleriyle olan uyumu gibi anlamı değiştirebilecek her türlü dilbilgisel unsur, algoritmanın performansını doğrudan etkileyebilmektedir. Tıpkı Long Short-Term Memory (LSTM) ağı gibi, bir cümledeki her kelimenin hem önceki hem de sonraki kelimelerle olan ilişkisini anlamlandırabilen çift yönlü bir yaklaşım kullanmaktadır. Bu özelliği sayesinde, doğal dilin karmaşıklığı ve bağlamsal zenginliği yüksek ortamlarda etkili bir şekilde çalışarak başarılı sonuçlar üretebilmektedir [23],[24]. Bu çalışmada, kredi kartı kullanımındaki şüpheli davranışları tespit etmek amacıyla BERT'in yanı sıra, önceden eğitilmiş modellerinden biri olan XLM-R gibi alternatif modeller de deneylerimizde değerlendirilmiştir [25]-[28].

Minkowski Mesafesi k-En Yakın Komşular

K-EYK, sınıflandırma ve regresyon için kullanılan parametrik olmayan bir tekniktir. Bir veri noktasını Minkowski mesafesine göre en yakın komşularının çoğuna göre sınıflandırır. Genel olarak Öklid ve Manhattan mesafesini genelleştirir ve şu şekilde tanımlanır:

$$f(x) = \left(\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^p\right)^{\frac{1}{p}} \quad (4)$$

Burada Denklem 4'te p metriğin türünü belirler. Bu esneklik K-EYK algoritmasının farklı veri dağılımlarına ve uygulama gereksinimlerine uyum sağlamasına olanak tanır [29].

Rastgele Orman

RO, sınıflandırma ve regresyon için kullanılan bir topluluk öğrenme tekniğidir. Eğitim sırasında birden fazla karar ağacı oluşturmakta ve sınıflandırmada sınıfların dış modlarını regresyonda ise tek tek ağaçların ortalama tahminlerini kullanmaktadır. Bu her bir ağacın eğitim verilerinden rastgele bir alt küme ve rastgele bir özellik alt kümesi tarafından oluşturulmasını sağlayarak modeli aşırı öğrenme ve genelleme sorunlarını azaltmada sağlam hale getirmektedir [30].

Topluluk Algoritmaları

Hard Voting Ensemble Algoritması

Hard Voting Ensemble (HV-Ensemble) yöntemi doğruluğu artırmak için çeşitli MÖ algoritmalarından yapılan tahminleri birleştirir. Topluluktaki her sınıflandırıcı çoğunluk oyu ile nihai çıktıyı tahmin etmeye çalışır. Bu yaklaşım özellikle bireysel modeller verilerin farklı bölümlerinde iyi performans gösterdiğinde ve dolayısıyla daha sağlam bir genel tahmin sağlamak için güçlü yönlerinden yararlandığında işe yaramaktadır [31].

Soft Voting Ensemble Algoritması

Soft Voting Ensemble (SV-Ensemble), hard voting yöntemine benzemekte ancak sınıf etiketleri yerine tahmin edilen olasılıkları kullanmaktadır. Topluluktaki her sınıflandırıcıdan her sınıf için bir olasılık tahmini sunması beklenmektedir. Nihai tahmin bu olasılıkların ortalamasıdır ve en yüksek ortalama olasılığa sahip sınıf seçilmektedir. Bu genellikle hard voting yönteminden daha iyi çalışmakta çünkü her sınıflandırıcının tahmininin güvenini dikkate almaktadır [32].

Extreme Gradient Boosting

Extreme Gradient Boosting (XGBoost) verimliliği, esnekliği ve taşınabilirliği ile bilinen güçlü bir MÖ algoritmasıdır. Tahminler yapmak için GA yöntemini kullanmakta ve genellikle sıralama, sınıflandırma ve regresyon problemlerinde üstün performans sergilemektedir.

Yüksek doğruluğu hızlı hesaplama süresi ve ölçeklenebilirliği nedeniyle yarışmalarda ve endüstriyel uygulamalarda sıklıkla tercih edilir. Algoritma büyük veri setlerinde ve karmaşık modellerde etkili olup optimizasyon ve düzenleme teknikleriyle aşırı öğrenmeyi azaltır ve genel performansı artırır. Paralel hesaplama yetenekleri sayesinde eğitim sürecini hızlandırır ve büyük veri kümeleriyle çalışırken avantaj sağlar. XGBoost ardışık olarak bir dizi zayıf öğrenici (genellikle karar ağaçları) inşa eder ve her yeni ağaç önceki ağaçların hatalarını düzeltmeye çalışır. Algoritma belirli bir kayıp fonksiyonunu minimize ederek çalışır. XGBoost fonksiyonu, tüm sınıflandırıcılar (j tree'ler) için bir düzenleme fonksiyonunun ve tamamında hesaplanan bir kayıp fonksiyonunun ürünüdür. Denklem 5, j tree ile tahmin üreten matematiksel yolun formülüdür.

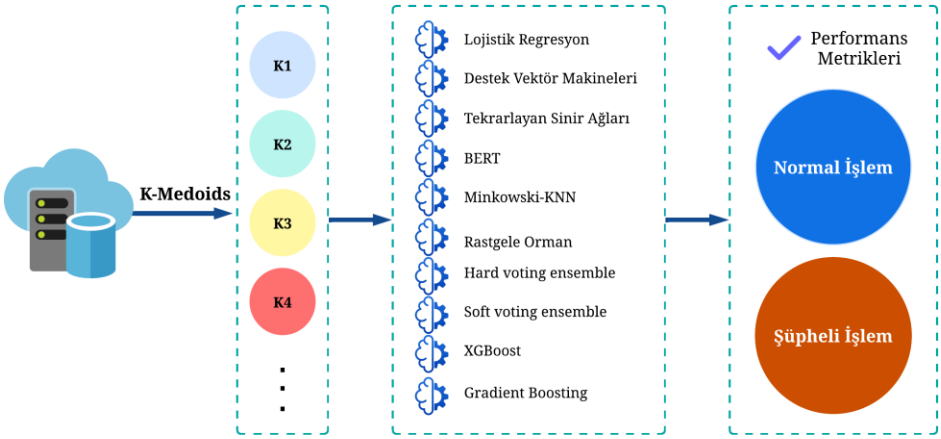
$$obj(0) = \sum_i^n l(y - y\hat{}) + \sum_{j=1}^{j} \&(fj) \quad (5)$$

Öğrenmenin ardından yerleşik ağaçları veya algoritmaları kullanarak yeni veri noktaları Denklem 6 çözülerek bulunabilir. [33].

$$F2(x) = H0(x) + eta\big(H1(x)\big) + eta(H2(x)) \quad (6)$$

Gradyan Artırma

GA ise makine öğrenmesinin öne çıkan algoritmalarından biridir ve çoğunlukla sınıflandırma ve regresyon faaliyetleri için kullanılır.



Şekil 2. Önerilen yöntemin akış şeması

GA, zayıf öğrenicileri bir araya getirerek güçlü bir tahmin modeli oluşturan bir topluluk öğrenme tekniğidir. Ardışık olarak zayıf tahmin ediciler ekleyerek ve bu tahmincilerin hatalarını düzelterek çalışır. Her bir zayıf tahmin edici önceki tahmincilerin hatalarını düzeltmek için bir hata fonksiyonu kullanır. GA algoritması karmaşık yapıları ve yüksek boyutlu veri setlerini etkili bir şekilde modelleyebilir, ancak öğrenme süreci daha uzun sürebilir ve aşırı uydurma riski taşır. Bu nedenle GA'nın hiper parametrelerinin dikkatlice ayarlanması önemlidir [32].

Hibrit Yaklaşım: Gözetimli ve Gözetimsiz Algoritmaların Bir Arada Kullanılması

Hem akademik çalışmalarda hem de sektörel problemlerin çözümünde denetimsiz kümeleme algoritmaları yaygın olarak kullanılmaktadır. K-ortalama algoritması, K-medoids algoritması, aşağıdan yukarı şeklinde bir yaklaşım olan aglomeratif (agglomerative) kümeleme algoritması, yukarıdan aşağı şeklinde bir yaklaşım olan bölünmüş kümeleme algoritması, BIRCH algoritması, OPTICS algoritması, Spektral Kümeleme algoritması, DBSCAN algoritması, DENCLUE algoritması en çok kullanılan kümeleme algoritmaları arasındadır [33].

Kredi kartları üzerindeki şüpheli davranış tespiti konulu bu çalışmada hem kümeleme hem de sınıflandırma algoritmalarını bir araya getiren hibrit bir yaklaşım tasarlanmıştır. Bu çalışmada, daha önce ağlarda nüfuz tespiti için kullanılan hibrit yaklaşım modeli esas alınarak, kredi kartlarındaki şüpheli davranışların tespitine yönelik entegrasyon sağlanmıştır [34]. Toplamda 284.807 işlem içeren veri seti, öncelikle K-medoids kümeleme algoritması kullanılarak, genel ve varsayılan parametreler doğrultusunda kümelere ayrılmıştır. Daha sonra, belirlenen kümeler üzerinde LR, DVM, TSA, BERT, Minkowski-K-EYK, RO, HV-Ensemble, XGBoost ve GA sınıflandırma algoritmaları uygulanmıştır. Son değerlendirme aşamasında, alt kümelerden elde edilen sınıflandırma sonuçlarına ait karışıklık matrisinde yer alan Doğru Pozitif (DP), Yanlış Pozitif (YP), Doğru Negatif (DN) ve Yanlış Negatif (YN) değerleri toplanarak, tüm test seti için sınıflandırma başarısını temsil eden toplam bir değer elde edilmiştir.

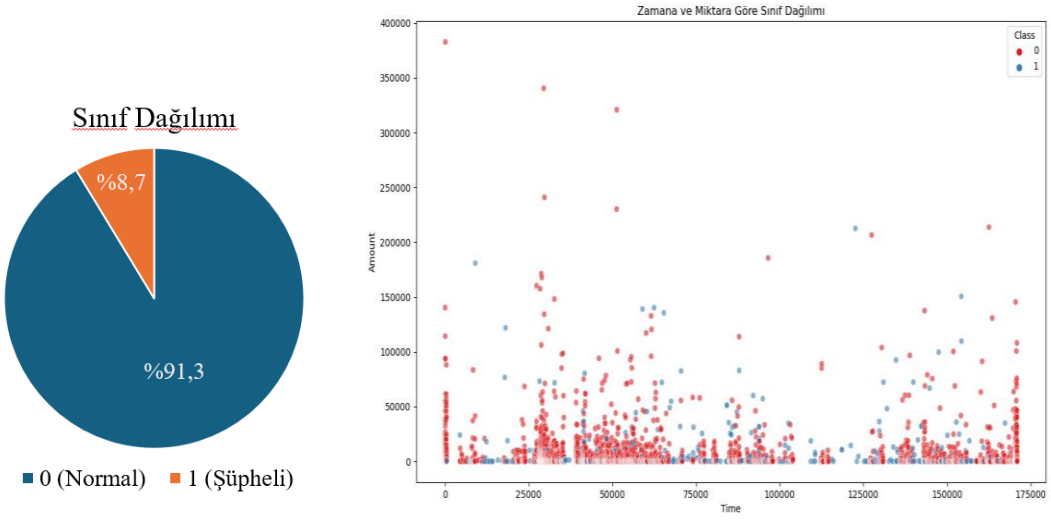
İlk olarak, veri seti ön işleme aşamasına tabi tutulmaktadır. Ardından, metin verilerinin uygun gösterimleri oluşturularak dönüştürme işlemi gerçekleştirilmektedir. Daha sonra, dönüştürülmüş veri seti üzerinde kümeleme işlemi uygulanmakta ve her kümede ayrı ayrı sınıflandırma yapılmaktadır. Son aşamada ise, her kümenin sınıflandırma sonuçları ve performans ölçütleri detaylı olarak değerlendirilerek modelin genel başarımı analiz edilmektedir (Şekil 2).

Deneysel Sonuçlar

Bu bölümde, kullanılan MÖ algoritmalarının performansları detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Çalışmada kullanılan veri seti, Avrupa'daki kredi kartı işlemlerinden oluşmakta ve PCA dönüşümleri ile anonimleştirilmiştir. Algoritmaların doğruluk ve F1 skoru performans metriklerine göre karşılaştırılması yapılmıştır. Sonuçlar, özellikle dengesiz veri setlerinde doğru model seçiminin dolandırıcılık tespiti üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. XGBoost algoritmasının üstün performans sergilediği gözlemlenmiş, bu da doğru model seçiminin dolandırıcılığı önleme çabalarına önemli katkılar sağlayabileceğini ortaya koymuştur.

Deneyler kapsamında BERT, XML-RoBERTa, DistilBERT ve Electra modelleri değerlendirilmiş olup, elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Yapılan deneysel analizler sonucunda, geleneksel BERT modelinin diğer varyantlara kıyasla en yüksek doğruluk ve F1 skoru sağladığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, makalede sunulan nihai sonuçlar, BERT modeli üzerinden raporlanmıştır.

Veri kümesi, algoritmaların performansını daha iyi değerlendirebilmek ve literatürdeki çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırma yapabilmek amacıyla farklı oranlarda eğitim ve test kümelerine ayrılmıştır. Tüm algoritmalar, veri kümesinin %80 eğitim - %20 test, %40 eğitim - %60 test ve %30 eğitim - %70 test oranlarında ayrı ayrı çalıştırılmış; elde edilen sonuçlar sırasıyla Tablo 2, Tablo 3, Tablo 4 ve Tablo 5'te raporlanmıştır. Gerçek dünyadaki pek çok problemde olduğu gibi, kredi kartı dolandırıcılığıyla ilgili problemlerde de etiketli veriye ulaşmak ve bu veriyi oluşturmak hem zor hem de



(a) (b)

Şekil 3. Veri setindeki sınıf dağılımı(a) ve zamana-miktara göre sınıf dağılımı(b)

maliyetlidir. Bu nedenle, özellikle %30 eğitim - %70 test gibi düşük eğitim oranlarında da algoritmalar çalıştırılarak performansları değerlendirilmiştir.

Veri Seti

Bu çalışmada, Avrupa'da gerçekleştirilen kredi kartı işlemlerinden oluşan ve sahtekarlık tespiti amacıyla kullanılan bir veri seti analiz edilmiştir. Erişimi herkese açık olan bu veri setinin içeriği şu şekildedir:

- Veri seti toplamda 284.807 işlemden oluşmakta olup, bu işlemlerin yalnızca %0.17'si dolandırıcılık olarak belirlenmiştir (Şekil 3).
- İşlemler, 2 günlük bir süre boyunca gerçekleştirilen Avrupa banka kartı sahiplerine ait verileri içerir. Bu süre boyunca, toplamda 492 sahte işlem tespit edilmiştir.
- Veri seti, 30 özellikten oluşmakta olup, PCA yöntemi ile anonimleştirilmiştir. Bu dönüşüm, özelliklerin gizliliğini korumak amacıyla gerçekleştirilmiş olup, orijinal veriler hakkında doğrudan bilgi sağlamamaktadır.
- "Time" özelliği işlemin zamanını, "Amount" özelliği işlemin miktarını, "Class" özelliği ise işlemin sahtekarlık olup olmadığını gösterir. "Class" özelliği, 0 ve 1 değerlerini alır; 0, sahte olmayan işlemleri ve 1, sahte işlemleri temsil eder [35]. Veri seti, iki farklı sınıf içermektedir. Sınıf 0, dolandırıcılık içermeyen işlemleri temsil etmekte olup, gerçek ve herhangi bir şüpheli davranış barındırmayan finansal işlemleri kapsamaktadır. Sınıf 1 ise, dolandırıcılık içeren işlemleri ifade etmekte ve şüpheli olarak rapor edilen, etik olmayan veya yasa dışı faaliyetleri işaret eden işlemleri içermektedir. Veri setindeki zamana ve işlem miktarına göre sınıf dağılımı, aşağıdaki grafikte gösterilmektedir.

Veri setinin dengesiz sınıf dağılımı göz önünde bulundurulduğunda, dolandırıcılık tespiti için geliştirilecek MÖ modellerinde sınıf dengesizliği yönetimi kritik bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Bu veri seti, dolandırıcılık tespiti ve güvenlik analizleri için önemli bir kaynak oluştururken, PCA dönüşümü sayesinde hem veri gizliliği korunmuş hem de işlemlerin derinlemesine analizi kolaylaştırılmıştır.

Sonuçlar

Eğitim oranlarına göre bakıldığında tüm algoritmalar %80 eğitim oranında en yüksek doğruluk skorlarına ulaşmaktadır. Bu durum daha fazla veri ile eğitimin algoritmaların performansını önemli ölçüde artırdığını göstermektedir.

Tablo 1. Veri seti özellikleri

Sınıf Tipi	Açıklama
Time	Her iki kart işleminin arasında geçen zamanı belirtir.
PCA Dönüşümleri	Veri setinde 30 tanesi mevcuttur. Gizlilik esasına uygun olması için yapılmış olan dönüşümlerdir.
Amount	Yapılan işlemin miktarını belirtir.
Class	Yapılan işlemin sahte olup olmadığını belirtir. Burada "1" sahte olduğunu, "0" ise olmadığını belirtir.

Eğitim ve test oranlarına göre çeşitli makine öğrenme algoritmalarının performansını değerlendirdiğimizde, K-medoids+GA algoritmasının tüm veri bölme senaryolarında en yüksek başarı oranlarını elde ettiği görülmektedir. %30 eğitim %70 test oranında %95.78, %40 eğitim %60 test oranında %95.98 ve %80 eğitim %20 test oranında %96.9 başarı oranlarına ulaşmıştır. Bu, K-medoids+GA algoritmasının yüksek doğruluk ve

genelleme kabiliyeti ile en iyi performans gösteren model olduğunu göstermektedir (Şekil 4).

İkinci en yüksek başarıyı K-medoids+XGBoost algoritması göstermektedir. Sırasıyla %30 eğitim %70 test oranında %94.56, %40 eğitim %60 test oranında %94.97 ve %80 eğitim %20 test oranında %95.45 doğruluğa ulaşmıştır.

Üçüncü sırada K-medoids+ SV-Ensemble algoritması yer almaktadır. Bu algoritmanın performansları %30 eğitim %70 test oranında %93.04, %40 eğitim %60 test oranında %93.43 ve %80 eğitim %20 test oranında %93.86 olarak kaydedilmiştir.

Tablo 2'de, medoid merkezli kümeleme yöntemi ile desteklenen farklı sınıflandırma algoritmalarının F1 skorları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Eğitim verisinin oranı arttıkça, tüm modellerin performansında genel bir iyileşme gözlemlenmiştir. En yüksek F1 skoruna, %80 eğitim oranıyla Gradient Boosting modeli ulaşmıştır. XGBoost ve Soft Voting Ensemble algoritmaları da başarılı sonuçlar elde etmiş, özellikle %95'in üzerinde F1 skorlarına ulaşarak dikkat çekmiştir.

Tablo 2. K-medoids kümeleme yöntemi ile kullanılan algoritmaların F1 skor değerleri

K-medoids+ Algoritma	**%30 eğitim %70 test**	**%40 eğitim %60 test**	**%80 eğitim %20 test**
K-medoids+LR	88.1	89.32	90.48
K- medoids+DVM	91.32	91.67	92.14
K- medoids+TSA	91.68	91.99	92.75
K- medoids+BERT	92.2	92.69	92.78
K- medoids+ Minkowski-K-EYK	85.1	86.37	86.56
K- medoids+RO	87.34	88.07	88.96
K- medoids+ HV-Ensemble algoritması	92.64	92.78	92.95
K- medoids+ SV-Ensemble algoritması	93.04	93.43	93.86
K- medoids+XGBoost	94.56	94.97	95.45
K- medoids+GA	95.78	95.98	96.9

Medoid merkezli kümeleme yöntemi ile entegre edilen sınıflandırma algoritmaları değerlendirildiğinde, en yüksek performansı GA algoritması göstermiştir. Bunu sırasıyla XGBoost ve SV-Ensemble yöntemleri takip etmektedir. HV-Ensemble ve BERT modelleri de tatmin edici sonuçlar vermiştir. TSA, DVM ve LR algoritmalarının performansı orta düzeyde kalırken, RO ve Minkowski-K-EYK algoritmaları diğer yöntemlere kıyasla daha düşük başarı oranları sergilemiştir. Bu sonuçlar, kullanılan yöntemlerin veri seti üzerindeki başarım farklılıklarını açıkça ortaya koymaktadır.

Ayrıca, özellik seçimi tekniklerinden BK, FS ve Ki-kare testi yöntemleri ayrı ayrı tüm algoritmalar ve tüm eğitim/test yüzdeleri üzerinde uygulanmış ve deney sonuçları Tablo 3, Tablo 4 ve Tablo 5'te raporlanmıştır. Tablo 3 BK tekniği ve K-medoids kümeleme yöntemi ile kullanılan algoritmaların F1 skor değerlerini göstermektedir. Tablo 3'e göre filtrelemeye dayalı denetimli bir özellik seçimi tekniği olan BK kullanımı ile nerdeyse tüm algoritmalar ve eğitim/test yüzdeleri bazında sınıflandırma performansının arttığı gözlenmektedir.

Tablo 3. Bilgi Kazancı tekniği ve K-medoids kümeleme yöntemi ile kullanılan algoritmaların F1 skor değerleri

K-medoids+ Algoritma	**%30 eğitim %70 test**	**%40 eğitim %60 test**	**%80 eğitim %20 test**
K-medoids+LR	89.42	90.66	91.81
K-medoids+DVM	92.61	93.01	93.52
K-medoids+TSA	93.02	93.17	94.12
K-medoids+BERT	93.29	93.89	94.18
K-medoids+ Minkowski-K-EYK	86.32	87.59	87.74
K-medoids+RO	88.46	89.29	90.21
K-medoids+ HV-Ensemble algoritması	93.95	94.08	94.25
K-medoids+ SV-Ensemble algoritması	94.34	94.74	95.17
K-medoids+XGBoost	95.67	96.14	96.60
K-medoids+GA	96.93	97.12	98.04

Benzer bir durum yine bir başka denetimli özellik seçimi tekniği olan ve literatürde yine BK tekniği gibi sıklıkla kullanıldığını gözlemlediğimiz FS tekniğinde de görülmektedir. Tablo 4 FS tekniği ve K-medoids

kümeleme yöntemi ile kullanılan algoritmaların F1 skor değerlerini göstermektedir.

Tablo 4. Fisher Skor tekniği ve K-medoids kümeleme yöntemi ile kullanılan algoritmaların F1 skor değerleri

K-medoids+ Algoritma	**%30 eğitim %70 test**	**%40 eğitim %60 test**	**%80 eğitim %20 test**
K-medoids+LR	89.30	90.57	91.75
K-medoids+DVM	91.85	92.92	93.43
K-medoids+TSA	92.96	93.28	94.05
K-medoids+BERT	93.49	93.79	93.78
K-medoids+ Minkowski-K-EYK	86.19	87.74	87.65
K-medoids+RO	88.54	89.28	90.17
K-medoids+ HV-Ensemble algoritması	93.84	94.08	94.25
K-medoids+ SV-Ensemble algoritması	94.34	94.74	95.17
K-medoids+XGBoost	95.88	96.27	96.79
K-medoids+GA	97.12	97.40	98.26

Tablo 5 ise Ki-kare tekniği ve K-medoids kümeleme yöntemi ile kullanılan algoritmaların F1 skor değerlerini göstermektedir. BK ve FS özellik seçimi yöntemlerinin aksine, Ki-kare özellik seçimi yöntemiyle yapılan deneylerdeki sınıflandırma başarısının PCA tekniği kullanılarak koşturulmuş olan deney durumlarının sınıflandırma başarısına göre daha düşük olduğu gözlenmektedir.

BK yöntemi, entropi temelli hesaplama yaparak bilgi açısından en değerli özellikleri ön plana çıkarırken; FS yöntemi, sınıflar arasındaki farkı artırıp sınıf içindeki benzerliği azaltarak en ayırt edici özellikleri seçmeye çalışır. Bu nedenle her iki yöntem de veri kümesindeki önemli ve anlamlı öznitelikleri başarıyla belirleyebilmekte ve sınıflandırma performansını artırmaktadır. Öte yandan, Ki-kare yöntemi istatistiksel olarak iki değişken arasındaki ilişkiyi ölçer ve etkili çalışabilmesi için özellikle kategorik verilerle ve bağımsız örneklerle çalışması gerekir. Ancak bu çalışmada kullanılan veri seti, PCA dönüşümüyle sayısal ve sürekli hale getirilmiş olduğu için Ki-kare yönteminin sınıflandırma performansına katkısı sınırlı kalmıştır. Bu nedenle, Ki-kare ile yapılan özellik seçimi sonrası elde edilen başarı oranları, BK ve FS yöntemleriyle elde edilen sonuçların gerisinde kalmıştır. Bu durum, kullanılan özellik seçimi yöntemlerinin veri tipi ve yapısıyla ne kadar uyumlu olduğunun sonuçlar üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir.

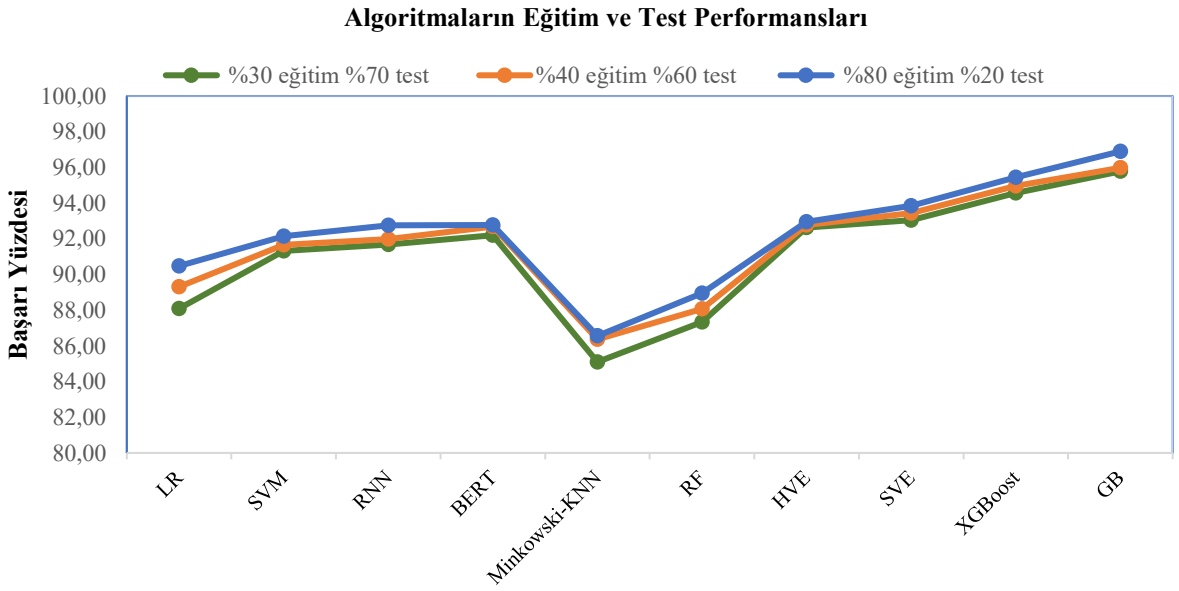
Tablo 5. Ki-kare tekniği ve K-medoids kümeleme yöntemi ile kullanılan algoritmaların F1 skor değerleri

K-medoids+ Algoritma	**%30 eğitim %70 test**	**%40 eğitim %60 test**	**%80 eğitim %20 test**
K-medoids+LR	87.31	88.52	89.67
K-medoids+DVM	90.48	90.84	91.31
K-medoids+TSA	90.85	91.12	91.75
K-medoids+BERT	91.37	91.86	91.94
K-medoids+ Minkowski-K-EYK	84.33	85.57	85.78
K-medoids+RO	86.55	87.38	88.16
K-medoids+ HV-Ensemble algoritması	91.81	91.94	92.23
K-medoids+ SV-Ensemble algoritması	92.20	92.59	93.02
K-medoids+XGBoost	93.71	94.13	94.59
K-medoids+GA	94.92	95.10	96.13

Bu çalışmada, kredi kartı dolandırıcılığının tespiti amacıyla, kümeleme yöntemi ile çeşitli sınıflandırma algoritmalarının entegrasyonunu içeren hibrit bir yaklaşım önerilmektedir. Veri kümesi üzerinde farklı algoritmalar ve çeşitli eğitim-test oranları kullanılarak elde edilen deneysel sonuçlar hem ticari hem de akademik ortamlar açısından oldukça motive edici ve umut vericidir. Önerilen yaklaşım, geliştirilebilecek bir kullanıcı arayüzü aracılığıyla platformdan bağımsız hale getirilebilir ve gerçek zamanlı çalışan bir sisteme entegre edilebilir.

Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, suçluluk analizi açısından literatüre katkı sağlamak amacıyla farklı MÖ yöntemlerinin doğruluk oranları karşılaştırılarak kredi kartı dolandırıcılığı tespiti için etkili bir model oluşturulması hedeflenmiştir. Sınıflandırma teknikleri olarak LR, KA, RO, K-EYK, DVM yöntemleri değerlendirilmiş, kümeleme tekniği olarak ise K-medoids yöntemi incelenmiştir. Ayrıca, birden fazla yöntemin birleştirildiği hibrit modeller de analiz edilmiştir. Eğitilen modellerin performansları, doğruluk ve F1 skoru açısından karşılaştırılarak, kredi



Şekil 4. Algoritmaların Eğitim ve Test Performansları

kartı dolandırıcılığını tespit etmede etkin bir model geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Kredi kartı dolandırıcılığını tespit eden tek ve mutlak üstünlüğe sahip bir algoritma bulunmamaktadır. Her veri madenciliği ve MÖ tekniği, kendine özgü güçlü ve zayıf yönlere sahiptir; bazı yöntemler yüksek doğruluk oranlarına ulaşırken, eğitim süresi açısından daha yavaş olabilmekte ya da tam tersi bir durum söz konusu olabilmektedir.

Çeşitli algoritmalar kullanılarak kredi kartı işlem veri seti üzerinde yapılan analizler sonucunda, modellerin yeni bir işlemin dolandırıcılık olup olmadığını belirleme süreçlerinde farklı sınıflandırma performansları sergilediği gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada kredi kartı dolandırıcılığının tespiti için medoid merkezli kümeleme yöntemi ile çeşitli sınıflandırma algoritmalarının entegrasyonunu içeren hibrit bir yaklaşım önerilmektedir. Farklı eğitim ve test oranlarında gerçekleştirilen deneyler sonucunda, en yüksek başarıyı GA algoritmasının elde ettiği, bunu sırasıyla XGBoost ve SV-Ensemble algoritmalarının takip ettiği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, sınıflandırma algoritmalarının başarımının kullanılan veri setinin özelliklerine, uygulanan ön işleme tekniklerine ve veri dağılımına duyarlı olduğunu göstermektedir.

Algoritmaların F1 skoru ve doğruluk değerleri %85'in üzerinde gerçekleşmiş olup, bu durum tüm modellerin veri kümesi üzerinde makul düzeyde başarı sağladığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, eğitim verisi oranı arttıkça performansın da yükseldiği, bu durumun ise modellerin öğrenme kapasitesi ile doğrudan ilişkili olduğu gözlemlenmiştir. En iyi sonuçlara ulaşan GA algoritması %96,9 F1 skoru ile öne çıkarken, klasik yöntemlerden LR ve RO daha düşük başarım sergilemiştir.

Elde edilen bulgular, literatürde yer alan diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında önemli benzerlikler ve farklılıklar göstermektedir. Örneğin, Awoyemi ve arkadaşları [36], K-EYK algoritmasının yüksek başarı sağladığını bildirirken, bu çalışmada Minkowski-K-EYK yöntemi diğer yöntemlere göre daha düşük performans sergilemiştir. Benzer şekilde, Muameleci [37], TBKSA modelinin sahtekarlık tespitinde üstün performans gösterdiğini ifade etmiştir; ancak bu çalışmada klasik makine öğrenimi algoritmaları arasında GA algoritması, %96,9 F1 skoru ile en başarılı model olmuştur. Alarfaj ve arkadaşları [38], derin öğrenme tabanlı modellerin yüksek doğruluk sağladığını belirtmiş; bu çalışmada ise BERT modeli başarılı olmakla birlikte, topluluk öğrenme tabanlı yöntemlerin (özellikle GA ve XGBoost) daha yüksek performans sunduğu görülmüştür. Bu sonuçlar, model başarımının kullanılan veri seti, veri dengesizliği, ön işleme yöntemleri ve algoritma parametrelerine göre değişebileceğini göstermekte; bu yönüyle çalışma, mevcut literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır.

Bu çalışmada uygulanan özellik seçimi tekniklerinin sınıflandırma performansı üzerindeki etkisi açık biçimde gözlemlenmiştir. BK yöntemi ile en yüksek F1 skoru %98.04'e (GA algoritması ile) ulaşırken, FS yöntemiyle bu değer %98.26'ya yükselmiştir. Buna karşın Ki-kare yöntemi ile elde edilen en yüksek F1 skoru %96.13'te kalmıştır. Bu sonuçlar, BK ve FS yöntemlerinin sınıflar arası ayrımı daha iyi temsil ettiğini ve sınıflandırma başarımını artırmada daha etkili olduğunu göstermektedir. Ki-kare'nin daha düşük performansı ise veri yapısının sürekli ve PCA dönüşümlü olmasıyla ilişkilendirilmiştir.

BERT tabanlı modelin genel olarak yüksek doğruluk sağlamasına rağmen, çalışmamızda özellikle topluluk öğrenme yöntemleri (örneğin GA ve XGBoost) ile

karşılaştırıldığında daha düşük F1 skoru elde ettiği gözlemlenmiştir. Bu durum, kullanılan veri setinin özellikleri ve BERT'in doğasına bağlı olarak açıklanabilir. Çalışmada kullanılan veri seti, PCA ile dönüştürülmüş sayısal ve bağlamsal bilgi içermeyen anonimleştirilmiş özelliklerden oluşmaktadır. BERT gibi bağlam tabanlı dil modelleri, metin verilerinde anlamsal ilişkileri modelleyerek üstün performans göstermektedir; ancak bu çalışmada kullanılan yapay olarak oluşturulmuş, metinsel olmayan, bağlamdan yoksun veri yapısı, BERT'in derin bağlam modelleme yeteneklerinden tam anlamıyla faydalanmasına engel olmuştur. Buna karşın, ağaç tabanlı ensemble algoritmalar, sayısal verilerdeki örüntüleri daha etkin bir şekilde modelleyebilmiş ve bu nedenle daha yüksek performans sergilemiştir. Bu bağlamda, BERT'in potansiyelinin daha çok metinsel ya da bağlamsal veri içeren görevlerde ortaya çıktığı ve bu tür yapısal veri setleriyle sınırlı kaldığı söylenebilir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, geliştirilen hibrit yaklaşımın, kredi kartı işlemlerinde şüpheli davranışları tespit etmede başarılı sonuçlar sunduğu görülmektedir. Bu yaklaşım, işlem verilerini kümelere ayırarak modellerin her alt gruba özel öğrenme yapmasına olanak tanımış ve dolandırıcılık tespitindeki doğruluğu artırmıştır. Özellikle topluluk temelli algoritmalar ile derin öğrenme modellerinin birlikte kullanımı hem geleneksel yöntemlerin yorumlanabilirliğini hem de derin öğrenmenin bağlamsal analiz gücünü birleştirerek daha güçlü sonuçlar üretmiştir.

Bu çalışmada geliştirilen sistem, bir grup kredi kartı işlem kümesindeki kullanıcı davranışlarını analiz ederek şüpheli işlemleri tespit etmeyi amaçlamaktadır. Önerilen yaklaşım, kümeleme ve çeşitli sınıflandırma algoritmalarının birleşiminden oluşan hibrit bir mimariye sahiptir. Bu yapı, sınıflandırma temelli herhangi bir veri kümesine entegre edilerek etkin bir şekilde sınıflandırma yapabilen esnek bir sistem sunmaktadır. Ayrıca, sistemde kullanılan özellik seçimi, kümeleme ve sınıflandırma algoritmaları ihtiyaçlara göre değiştirilebilir veya geliştirilebilir. Kısacası, bu yaklaşım sınıflandırmaya dayalı farklı problem alanlarına da kolaylıkla uyarlanabilecek esneklikte tasarlanmıştır.

Önerilen yöntemin yüksek sınıflandırma performansı sergilemesi hem sektörel uygulamalar hem de akademik literatür açısından önemli bir katkı olarak değerlendirilmektedir. Ancak, dünya genelinde dolandırıcılık vakalarının artması, bu alandaki sistemlerin daha karmaşık ve dinamik yapılandırılmasını gerekli kılmaktadır. Özellikle kredi kartı dolandırıcılığı tespit sistemlerinin gerçek zamanlı ve dinamik bir şekilde çalışabilmesi büyük fayda sağlayacaktır. Bu bağlamda, çalışmada sunulan yöntemin gerçek zamanlı olarak çalışmaması, en önemli kısıtlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, önerilen yaklaşımın farklı işletim sistemleri ve yazılım kütüphaneleri üzerinde test edilmemiş olması, platforma bağımlılığı artırmakta ve bu durum da bir diğer önemli kısıt olarak değerlendirilmektedir. Bunlara ek olarak, kredi kartlarının yoğun olarak kullanıldığı internet tabanlı bankacılık, ödeme sistemleri ve e-ticaret uygulamalarıyla entegrasyon sağlayabilecek bir kullanıcı arayüzünün bulunmaması, yöntemin uygulanabilirliğini sınırlayan bir başka kısıt olarak görülebilir.

Gelecekte, önerilen sistemin gerçek zamanlı sistemlerle entegre edilerek sahtekarlıkların anlık olarak tespit edilmesi ve önlenmesi hedeflenmektedir. Ayrıca, farklı türde işlem verileriyle genişletilmiş veri kümeleri ve zaman serisi özelliklerinin dikkate alındığı dinamik modeller ile başarımın daha da artırılabileceği düşünülmektedir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Bu çalışma Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 11558 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Kaynaklar

[1] J. K. Afriyie et al., "A supervised machine learning algorithm for detecting and predicting fraud in credit card transactions," Decision Analytics Journal, vol. 6, p. 100163, 2023.

[2] S. Singh, M. Kashyap, and N. Tantubay, "Comparative Analysis of ANN, RNN, and GRU for Credit Card Fraud Detection," 2025.

[3] S. Ounacer et al., "Using Isolation Forest in anomaly detection: the case of credit card transactions," Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN), vol. 6, no. 2, pp. 394–400, 2018.

[4] S. Jiang et al., "Credit card fraud detection based on unsupervised attentional anomaly detection network," Systems, vol. 11, no. 6, p. 305, 2023.

[5] O. R. Mohsen, G. Nassreddine, and M. Massoud, "Credit Card Fraud Detector Based on Machine Learning Techniques," Journal of Computer Science and Technology Studies, vol. 5, no. 2, pp. 16–30, 2023.

[6] A. G. Oketola, T. Gbadebo-Ogunmefun, and A. Agbeja, "A Review of Credit Card Fraud Detection Using Machine Learning Algorithms," 2023.

[7] K. Muameleci, "Anomaly Detection in Credit Card Transactions using Multivariate Generalized Pareto Distribution," 2022.

[8] J. O. Awoyemi, A. O. Adetunmbi, and S. A. Oluwadare, "Credit card fraud detection using machine learning techniques: A comparative analysis," in Proc. Int. Conf. Computing Networking and Informatics (ICCNI), 2017, pp. 1–9.

[9] N. S. Alfaiz and S. M. Fati, "Enhanced credit card fraud detection model using machine learning," Electronics, vol. 11, no. 4, p. 662, 2022.

[10] R. Setiawan et al., "Fraud Detection in Credit Card Transactions Using HDBSCAN, UMAP and SMOTE Methods," Int. J. Sci. Technol. Manage., vol. 4, no. 5, pp. 1333–1339, 2023.

[11] F. K. Alarfaj et al., "Credit card fraud detection using state-of-the-art machine learning and deep learning algorithms," IEEE Access, vol. 10, pp. 39700–39715, 2022

[12] D. Theng and K. K. Bhoyar, "Feature selection techniques for machine learning: a survey of more than two decades of research," Knowl. Inf. Syst., vol. 66, pp. 1575–1637, 2024. doi:10.1007/s10115-023-02010-5.

[13] M. A. Hall, Correlation-based feature selection for machine learning, Ph.D. dissertation, Univ. Waikato, 1999.

[14] Q. Gu, Z. Li, and H. Han, "Generalized Fisher Score for Feature Selection," arXiv preprint, arXiv:1202.3725, 2012.

[15] H. Budak, "Özellik Seçim Yöntemleri ve Yeni Bir Yaklaşım," Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, vol. 22, pp. 21–31, 2018.

[16] J. Han, "Spatial clustering methods in data mining: A survey," in Geographic Data Mining and Knowledge Discovery, pp. 188–217, 2001.

[17] N. K. Kaur, U. Kaur, and D. Singh, "K-Medoid clustering algorithm-a review," Int. J. Comput. Appl. Technol., vol. 1, no. 1, pp. 42–45, 2014.

[18] T. S. Madhulatha, "Comparison between k-means and k-medoids clustering algorithms," in Proc. Int. Conf. Adv. Comput. Inf. Technol., Springer, Berlin, 2011.

[19] A. Entezami, H. Sarmadi, and B. S. Razavi, "An innovative hybrid strategy for structural health monitoring by modal flexibility and clustering methods," J. Civil Struct. Health Monit., vol. 10, no. 5, pp. 845–859, 2020.

[20] M. P. LaValley, "Logistic regression," Circulation, vol. 117, no. 18, pp. 2395–2399, 2008.

[21] A. Sherstinsky, "Fundamentals of recurrent neural network (RNN) and long short-term memory (LSTM) network," Physica D: Nonlinear Phenomena, vol. 404, p. 132306, 2020.

[22] M. V. Koroteev, "BERT: a review of applications in natural language processing and understanding," arXiv preprint, arXiv:2103.11943, 2021.

[23] A. Kara, "Global solar irradiance time series prediction using long short-term memory network," Gazi Univ. J. Sci. Part C, vol. 4, no. 7, pp. 882–892, 2019.

[24] M. Lan et al., "Supervised and traditional term weighting methods for automatic text categorization," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. 31, no. 4, pp. 721–735, 2008.

[25] K. Clark, "Electra: Pre-training text encoders as discriminators rather than generators," arXiv preprint, arXiv:2003.10555, 2020.

[26] A. Conneau, "Unsupervised cross-lingual representation learning at scale," arXiv preprint, arXiv:1911.02116, 2019.

[27] V. Sanh, "DistilBERT, a distilled version of BERT: smaller, faster, cheaper and lighter," arXiv preprint, arXiv:1910.01108, 2019.

[28] S. Schweter, "BERTurk-BERT models for Turkish," Zenodo, 2020. doi:10.5281/zenodo.3770924.

[29] P. Müller, "Flexible K nearest neighbors classifier: derivation and application for ion-mobility spectrometry-based indoor localization," in Proc. Int. Conf. Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), IEEE, 2023.

[30] S. Xuan et al., "Random forest for credit card fraud detection," in Proc. IEEE Int. Conf. Networking, Sensing and Control (ICNSC), 2018.

[31] P. Tomar, S. Shrivastava, and U. Thakar, "Ensemble learning based credit card fraud detection system," in Proc. Conf. Information and Communication Technology (CICT), IEEE, 2021.

[32] M. A. Mim, N. Majadi, and P. Mazumder, "A soft voting ensemble learning approach for credit card fraud detection," Heliyon, vol. 10, no. 3, 2024.

[33] A. E. Ezugwu et al., "A comprehensive survey of clustering algorithms: State-of-the-art machine learning applications, taxonomy, challenges, and future research prospects," Eng. Appl. Artif. Intell., vol. 110, p. 104743, 2022.

[34] S. K. Çalışkan and İ. Soğukpınar, "Kxknn: K-means ve k en yakin komşu yöntemleri ile ağlarda nüfuz tespiti," EMO Yayınları, pp. 120–124, 2008.

[35] A. Dal Pozzolo et al., "Credit card fraud detection: a realistic modeling and a novel learning strategy," IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst., vol. 29, no. 8, pp. 3784–3797, 2017.

[36] J. O. Awoyemi, A. O. Adetunmbi, and S. A. Oluwadare, "Credit card fraud detection using machine learning techniques: A comparative analysis," in Proc. Int. Conf. Computing Networking and Informatics (ICCNI), IEEE, 2017, pp. 1–9.

[37] K. Muameleci, "Anomaly Detection in Credit Card Transactions using Multivariate Generalized Pareto Distribution," 2022.

[38] F. K. Alarfaj et al., "Credit card fraud detection using state-of-the-art machine learning and deep learning algorithms," IEEE Access, vol. 10, pp. 39700–39715, 2022.

Dicle University
Journal of Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/dumf
duje.dicle.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

Şüpheli Haberlerin Tespitine Yönelik Derin Öğrenme Tabanlı Haber Teyit Sisteminin Gerçekleştirilmesi

Development of a Deep Learning Based News Verification System for The Detection of Suspicious News

Nurcan Yardımcı[1*], Burhan Ergen[2], Hatice Karaoğlu[3]

[1]Fırat Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, nurcann.yardimci@gmail.com, ORCID: 0009-0002-0476-9856

[2] Fırat Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, bergen@firat.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3244-2615

[3] Fırat Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, haticekaraoglu02@gmail.com, ORCID: 0009-0006-3750-1935

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 4 Mart 2025
Revizyon 6 Nisan 2025
Kabul 2 Haziran 2025
Online 30 Haziran 2025

Anahtar Kelimeler:

Anlamsal benzerlik, doğal dil işleme, metin özetleme, şüpheli haber tespiti

ÖZ

Dijital medyanın yaygınlaşması, sahte haberlerin toplumu olumsuz etkilemesine yol açmaktadır. Özellikle sosyal medya platformları, yanlış bilgilerin hızla yayılmasına sebep olmaktadır. Bu durum bireylerin yanlış yönlendirilmesine, toplumsal kutuplaşmaya ve güven kaybına yol açmaktadır. Bu nedenle, sahte haberlerin hızlı ve güvenilir bir şekilde tespiti çağımızın en önemli sorunlarından biri haline gelmiştir. Bu çalışmada, derin öğrenme ve doğal dil işleme (NLP) tabanlı yenilikçi bir haber teyit sistemi geliştirilmiştir. Sistem, dijital haber içeriklerinin doğruluğunu analiz ederek, kullanıcıları yanlış bilgilendirmeden korumayı hedeflemektedir. Geliştirilen model, haber metinlerini Zemberek kütüphansiyle işleyerek optimize etmekte, ardından BERT tabanlı özetleme yöntemleriyle metinlerin anlamını zenginleştirmektedir. Zemberek, Türkçe metinlerin doğal dil işleme süreçlerini kolaylaştırırken, SBERT modeli ise haber içeriklerinin daha derin anlamsal analizini gerçekleştirmektedir. Ayrıca YAKE algoritması haber içeriklerinden anahtar kelimeler çıkararak güvenilir kaynaklarla karşılaştırılmasını kolaylaştırmaktadır. Metinler arasındaki anlamsal benzerlik SBERT modeli kullanılarak ölçülmektedir. Kelime bazlı benzerlikler ise N-gram yöntemiyle ölçülmektedir. Bu iki yöntemden elde edilen sonuçlar birleştirilerek, haberin doğruluk skoru hesaplanmakta ve kullanıcıya sunulmaktadır. Önerilen sistem, sahte haberlerin tespitinde yüksek doğruluk oranları sunmakta ve gerçek zamanlı veri analizi sayesinde güncel olaylardaki yanlış bilgileri hızla belirlemektedir. Çok dilli ve çok modaliteli bir yapıya kavuşturulması hedeflenen sistemin uluslararası sahte haber tespiti için de etkili bir çözüm sunması hedeflenmektedir.

ARTICLE INFO

Article History:

Received 4 May 2025
Received in revised form 6 April 2025
Accepted 2 June 2025
Available online 30 June 2025

Keywords:

Semantic similarity, natural language processing, text summarization, suspicious news detection

DOI: 10.24012/dumf.1651348

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

The proliferation of digital media causes fake news to negatively affect society. Social media platforms, in particular, cause false information to spread rapidly. This situation leads to misdirection of individuals, social polarization and loss of trust. Therefore, rapid and reliable detection of fake news has become one of the most important problems of our time. In this study, an innovative news verification system based on deep learning and natural language processing (NLP) has been developed. The system aims to protect users from misinformation by analyzing the accuracy of digital news content. The developed model optimizes news texts by processing them with the Zemberek library, and then enriches the meaning of the texts with BERT-based summarization methods. While Zemberek facilitates the natural language processing of Turkish texts, the SBERT model performs deeper semantic analysis of news content. Moreover, the YAKE algorithm extracts keywords from news content, thereby facilitating its comparison with reliable sources. Semantic similarity between texts is measured using the SBERT model. Word-based similarities are measured with the N-gram method. By combining the results obtained from these two methods, the accuracy score of the news is calculated and presented to the user. The proposed system offers high accuracy rates in detecting fake news and quickly identifies misleading information in current events thanks to real-time data analysis. The system, which is intended to be enhanced with a multilingual and multimodal structure, is also expected to provide an effective solution for international fake news detection.

Giriş

Son zamanlarda dijital medyanın hızlı bir şekilde popüler olmasıyla beraber bireylerin ve toplulukların da bilgiye erişimi artmıştır. Bu erişimin artmasıyla beraber sahte haberler de artarak kolay bir şekilde yayılmıştır. Her birey haber üreticisi veya paylaşımcısı haline gelmiştir. Bununla beraber, haberlerin doğruluk ve güvenilirlik açısından denetlenme ihtiyacı da artmıştır. Bilgilerin hızla yayılıyor olması, özellikle doğruluğu teyit edilmemiş ya da kasıtlı olarak oluşturulmuş sahte haberlerin toplum üzerinde ciddi etkiler bırakmasına sebep olmaktadır. Özellikle ulusal güvenlik, kişisel haklar, sosyal düzen ve kamu sağlığı gibi kritik konulardaki sahte haberler; bireylerin yanlış yönlendirilmesine, toplumun manipülasyonuna ve yanlış bilgilendirmeye yol açarak ciddi sosyal, ekonomik ve politik sonuçlara sebep olmaktadır. Bu durumlar dikkate alınırsa güvenilir bilgiye ulaşmak giderek daha zor ve önemli hale gelmiştir [1,2]. Sahte haberlerin tespiti için yapılmış olan çalışmalar, bilgi yoğunluğunun fazla olduğu bu dönemde yetersiz kalmaktadır. Özellikle doğrulama sürecinin hız ve güvenilirlik açısından gereksinimleri dikkate alındığı zaman, insan gücüne dayalı yöntemler ölçeklenebilirlik sorunlarına sebep olmaktadır. Bu yüzden, derin öğrenme ve doğal dil işleme (NLP) teknikleri kullanılarak geliştirilmiş otomatik haber teyit sistemleri önem kazanmaktadır [3]. Geliştirilmiş haber teyit sistemlerinin, sosyal medya platformları ve dijital haber siteleriyle entegrasyonu sağlandığında, kullanıcıların yanlış bilgilendirilmesinin önüne geçilmesinde kritik bir rol oynayacaktır [4].

Haber metinlerini anlamlı olacak şekilde analiz edebilmek için, Zemberek gibi kütüphaneler kullanılarak haberlerin köklerine ayrılması, gereksiz kelimelerin temizlenmesi ve metnin analize hazır hale getirilmesi sağlanmaktadır. Sahte haber tespitinin geliştirilmesi noktasında, BERT ve SBERT gibi derin öğrenme tabanlı dil modellerinin imkan sağladığı yüksek doğruluk oranları, özellikle cümle temsillerinin zenginleştirilmesinde etkili bir yöntem olmaktadır [5]. Bu modeller, metinlerin anlamsal düzeyde kıyaslanmasına olanak tanırken, Chu vd. [6] önermiş olduğu R-SBERT gibi geliştirilen yaklaşımlar, sahte haber tespitinin doğruluğunu daha da arttırmaktadır. Metinlerin yüzeysel benzerliklerini incelemek için N-gram ve Kosinüs Benzerliği gibi ölçütler de kullanılmaktadır. Lopez-Gazpio vd. [7] doğal dil anlamada yaygın olarak kullanılan iki görev olan anlamsal metin benzerliği ve doğal dil çıkarımı üzerinde N-gram tabanlı model geliştirmişlerdir. Model, cümlelerde farklı uzunluktaki N-gramlar arasındaki ilişkileri modellemek için kullanılmıştır ve kelime tabanlı modellere kıyasla önemli iyileştirmeler sağlanmıştır. Sosyal medya üzerindeki sahte haberlerin tespitiyle alakalı başka bir çalışmada da SVM ve LSTM modelleri kullanılmış, özellikle yüksek doğruluk oranları ile sahte haberlerin hızlı bir şekilde tespitinin önemi vurgulanmıştır [8].

Haber teyit sisteminde, metinlerdeki en belirgin bilgilerin öne çıkarılması için YAKE gibi anahtar kelime çıkarma teknikleri de kullanılmaktadır. Campos vd. [9] YAKE üzerine yaptıkları çalışmada, modelin dil ve alan bağımsız olarak belgelerden anahtar kelime çıkarımında yüksek performans gösterdiği belirtilmiştir. YAKE modeli, haberlerin önemli kelimelerini öne çıkararak incelenecek içeriklerin güvenilir kaynaklarla karşılaştırılmasını kolaylaştırmaktadır. Diğer taraftan TF-IDF ve TextRank algoritmaları birleştirilerek sunulan yöntemde, metin madenciliğindeki anahtar kelime çıkarımının doğruluğunun artırılması hedeflenmiştir [10]. Veri toplama aşamasında, haber içerikleri web scraping ve RSS ile toplanmaktadır. RSS protokolü, belirlenmiş olan sitelerden güncel haber içeriklerin otomatik olarak alınmasını sağlayarak güncellenen içeriklere hızlı erişim sunmaktadır. Web scraping işlemlerinde Selenium ve BeautifulSoup gibi araçlar kullanılarak her haber sitesine özgü HTML yapılarına göre veriler toplanmaktadır [11]. Nair vd. [12], sosyal medya tabanlı sahte haber tespit çalışmalarında da vurguladığı gibi veri madenciliği süreçlerinde veri doğruluğu artırılırken doğrulama sürecinin etkinliği de artırılmaktadır. Derin öğrenme tabanlı modellerin sunmuş olduğu güçlü anlam çıkarımı yetenekleri geleneksel anahtar kelime ve yüzeysel benzerlik ölçütleriyle birleştirilerek, sahte haber tespitinde daha detaylı bir çözüm sunmaktadır. TOP-Rank algoritması gibi konu bazlı sıralama yöntemler ise, anahtar kelime çıkarımının doğruluğunu artırmak için kullanılan diğer bir tekniktir [13]. Ayrıca, Dinçer vd. [14] siber zorbalık tespiti çalışmasında kullandığı makine öğrenmesi ve veri madenciliği yöntemleri de, önerilen haber teyit sisteminin altyapısında kullanılabilecek nitelikte teknikler sunmaktadır. Syed vd. [15] , sunduğu hibrit öğrenme modeli, zayıf gözetimli öğrenme teknikleriyle entegre edilerek sahte haberlerin doğruluk oranlarını artırmaktadır. Böylece topluma doğru bilgi aktarma hedefine katkı sunmaktadırlar. Bu doğrulama sistemi, dijital medyada sahte haberlerin hızla tespit edilmesi ve toplumun güvenilir bilgiye erişiminin sağlanması noktasında güçlü bir araç olarak öne çıkmaktadır.

Koru vd. [16] Twitter üzerinden paylaşılan Türkçe haberlerin sahte olup olmadığını tespit etmek amacıyla yapay zekâ temelli çalışma yürütmüştür. Araştırmada, doğrulama platformlarından elde edilen sahte haberler ve ana akım medya hesaplarından alınan gerçek haberlerle oluşturulan TR_FaRe_News adlı Türkçe veri kümesi geliştirilmiştir. Bu veri kümesi, Zemberek kütüphanesi ile ön işleme tabi tutulmuştur. Ardından BoW, TF-IDF, Word2Vec gibi vektörleştirme yöntemleri ve çeşitli makine öğrenimi algoritmaları (SVM, RF, NB vb.) ile sınıflandırılmıştır. Daha sonra, önceden eğitilmiş BERT ve BERTurk modelleri Bi-LSTM ve CNN katmanları ile genişletilerek hem dondurulmuş hem de serbest parametre yaklaşımlarıyla incelemeye alınmıştır.

Özbay vd. [17] sosyal medyada yayılan sahte haberlerin tespitine yönelik iki aşamalı bir model önermiştir. İlk aşamada, yapılandırılmamış haber metinleri metin madenciliği teknikleri ile işlenerek sayısal ve dilsel gürültülerden arındırılmıştır. Ardından Vektör Uzay Modeli (VUM) kullanılarak yapısal formata dönüştürülmüştür.

İkinci aşamada ise, ISOT sahte haber veri kümesi üzerinde toplam on farklı denetimli yapay zekâ algoritması (Naive Bayes, JRip, J48, Random Forest, SGD, LWL, DTNB, Bagging, CvR, OneR) dört farklı eğitim-test senaryosu ile değerlendirilmiştir.

Kulaksız [18], Türkçe ana akım medyada yer alan haberlerin sahte mi gerçek mi olduğunu tespit edebilen bir sistem geliştirmiştir. TRT Gündem ve Teyit.org kaynaklarından toplanan haberler ön işleme adımlarından geçirilerek etiketlenmiştir. Özellik çıkarımı için TF-IDF, CountVectorizer ve Word2Vec yöntemlerini kullanmıştır. Ardından SVM, Lojistik Regresyon, Naive Bayes, K-NN, Karar Ağacı, Rastgele Orman, LSTM ve BERTurk algoritmaları ile haberleri sınıflandırmıştır.

Önceki çalışmalarda Türkçe sahte haber tespiti için farklı yöntemler önerilmiştir. Örneğin, Koru vd. [16] çalışmalarında BERT ve BERTurk modellerini, Bi-LSTM ve CNN katmanlarıyla genişleterek Twitter üzerinde paylaşılan Türkçe haberlerin sınıflandırılmasını hedeflemiştir. Ancak bu yaklaşım, sabit veri kümesi ile sınırlı kalmış ve dinamik içerik akışına odaklanmamıştır. Özbay vd. [17] ise sosyal medya verilerine dayalı olarak iki aşamalı bir model geliştirmiş ve farklı denetimli makine öğrenmesi algoritmalarını değerlendirmiştir. Ancak gerçek zamanlı veri toplama, özetleme ve çok katmanlı benzerlik analizine yer verilmemiştir. Kulaksız [18] tarafından geliştirilen çalışmada ise, TF-IDF, Word2Vec ve CountVectorizer gibi geleneksel özellik çıkarım yöntemleriyle etiketlenmiş Türkçe haberler sınıflandırılmıştır. Ancak bu yaklaşım da özetleme ya da semantik benzerlik temelli bütüncül analiz yapısından uzaktır. Gerçek zamanlı veri akışını kullanan, SBERT, BERTSum ve YAKE modellerini entegre şekilde birleştirerek Türkçe haber doğruluğunu analiz eden bir sistem literatürde sınırlı sayıdadır. Bu çalışmada önerilen sistem, gerçek zamanlı haber akışı ile veri toplama, BERTSum ile metin özetleme**,** YAKE algoritması ile anahtar kelime çıkarımı**,** SBERT ile anlamsal ve N-gram ile yüzeysel benzerlik analizini birleştiren çok katmanlı bir doğrulama süreci sunarak Türkçe içeriklere özel olarak önemli bir katkı sunmaktadır.

Çalışmada önerilen yöntem; haber metinlerinin işlenmesi, özetlenmesi, anahtar kelime çıkarımı ve benzerlik analizini bir arada kullanan bütünleşik bir yaklaşım sunmaktadır. Sistem, metinlerin güvenilir kaynaklardan alınan içeriklerle kıyaslanarak doğruluğunun analiz edilmesi temeline dayanmaktadır. İlk aşamada, dijital ortamdaki haber içerikleri Zemberek kütüphanesi kullanılarak dil ön işleme sürecine tabi tutulmaktadır. Sonrasında BERT tabanlı çıkarımsal özetleme yöntemi olan BERTSum ile metinler özetlenmektedir. Özetlenen metinlerden YAKE algoritması aracılığıyla anahtar kelimeler çıkarılmakta ve bu kelimeler güvenilir haber kaynaklarıyla eşleştirilmektedir. Son olarak, metinler arasındaki benzerlikler SBERT modeli ile anlamsal düzeyde ve N-gram yöntemi ile kelime düzeyinde analiz edilmektedir. Elde edilen sonuçlar Ortak Skor hesabı ile birleştirilerek haberin doğruluk derecesi hesaplanmaktadır. Bu çok aşamalı sistem sayesinde, sahte haberlerin tespiti hem içerik derinliği hem de yüzeysel benzerlik açısından kapsamlı bir şekilde gerçekleştirilmektedir.

Mevcut literatürde sahte haber tespiti üzerine yapılan çalışmaların büyük bir kısmı sabit, etiketlenmiş veri kümeleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Gerçek zamanlı, dinamik haber akışlarıyla çalışan sistemler oldukça sınırlı kalmıştır. Bu çalışmanın literatüre katkısı, sahte haberlerin tespitine yönelik geliştirilen sistemin gerçek zamanlı veriyle çalışabilmesi, hem anlamsal hem yüzeysel benzerlikleri birleştiren özgün Ortak Skor algoritmasını içermesi ve Türkçe haber içerikleri üzerinde yüksek başarı oranları sunabilmesidir. Literatürde SBERT, YAKE ve BERTSum gibi bileşenlerin birlikte kullanıldığı, özellikle Türkçe içerikler üzerinde çalışan ve güvenilir kaynaklara dayalı otomatik referans eşlemesi yapan sistem sayısı oldukça sınırlıdır. Ayrıca, geliştirilen "Ortak Skor" algoritması ile birden fazla benzerlik yönteminin ağırlıklı kombinasyonu gerçekleştirilerek daha doğruluklu bir tespit modeli sunulmuştur. Gerçek zamanlı veri kullanımı, verilerin işlenebilmesi, çok aşamalı analiz yapısı ve yerli kaynaklardan otomatik içerik çekme mekanizması ile bu çalışma, Türkçe haber doğrulama sistemlerine hem metodolojik hem de uygulamalı anlamda özgün bir katkı sunmaktadır. Özellikle kriz dönemlerinde ortaya çıkan bilgi kirliliğiyle başa çıkmak için sistemin uygulama alanını genişletmekte ve bu yönüyle literatüre katkı sağlamaktadır.

Materyal ve Metot

Veri Seti Kullanımı ve Veri Toplama Süreci

Bu çalışmada, sabit ve önceden etiketlenmiş bir eğitim veri seti kullanılmasından ziyade, sistemin gerçek zamanlı ve güncel haber içerikleri üzerinde çalışması hedeflenmiştir. Önerilen sistem gerçek zamanlı haber akışları üzerinde çalışmak üzere tasarlanmıştır. Veri toplama süreci kapsamında, Türkiye'de yer alan haber kaynaklarından RSS protokolü ve web scraping (Selenium ve BeautifulSoup) teknikleriyle anlık haber içerikleri toplanmaktadır. Çekilen haberler başlık, içerik, yayın tarihi ve haber bağlantısı (URL) bilgilerini içermektedir. Örnekleme sürecinde, farklı temalarda (gündem, sağlık, siyaset, kriz anları vb.) yaklaşık 300 adet haber metni üzerinde deneme yapılmıştır. Böylece, sistemin yalnızca geçmiş verilere değil, güncel ve dinamik içeriklere dayalı analiz yapabilmesi sağlanmıştır. Bu yaklaşım, sahte haber tespit sürecini daha esnek ve güncel hale getirerek, özellikle kriz dönemleri gibi bilgi akışının hızlı ve değişken olduğu durumlarda daha etkili sonuçlar elde edilmesine olanak tanımaktadır. Elde edilen veriler, ön işleme adımlarının ardından özetleme, anahtar kelime çıkarımı ve benzerlik analizi süreçlerine dahil edilmekte ve sistem bu veriler üzerinden haberlerin doğruluğunu değerlendirmektedir.

Metin Özetleme Yöntemleri

Metin özetleme, bir veya birden fazla metindeki bilgileri analiz ederek önemli noktaları seçip daha kısa ve anlamlı bir

biçimde sunan doğal dil işleme yöntemidir. Bu süreç, metindeki temel fikirleri ve mesajları kaybetmeden kullanıcıya bilgi yükünü azaltarak hızlı ve etkili bir şekilde sunmayı amaçlar [19].

Çıkarımsal metin özetleme, orijinal metindeki önemli cümle veya ifadeleri seçerek oluşturulan, doğal dil işleme (NLP) alanında sıkça kullanılan bir metin özetleme yöntemidir. Bu yöntem, metni yeniden yazmak yerine, doğrudan metindeki önemli bölümleri seçerek özet oluşturmaktadır. Çıkarımsal metin özetlemede, her cümle veya ifadenin önem derecesi, kelime sıklığı, cümle uzunluğu, metindeki konumu ve bağlamsal ilişkiler gibi ölçütlerle belirlenmektedir. Çıkarımsal özetleme yöntemleri, dilbilgisi hatası yapmaması ve bağlamsal anlamın korunmasını sağlaması sebebiyle avantajlıdır [20]. Ayrıca, büyük veri kümelerinde hızlı ve etkili bir şekilde uygulanabilmektedirler. Ancak bu yöntem, metindeki cümleleri olduğu gibi kullandığı için özetin akıcı olmaması gibi dezavantajlara sahiptir [21]. Çıkarımsal özetleme, haberlerin, akademik makalelerin ve yasal belgelerin özetlenmesi gibi pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Çıkarımsal metin özetlemede istatistiksel yöntemlere bakıldığı zaman kelime frekans analizi, metindeki en sık kullanılan kelimeleri belirleyerek özetleme sürecinde önemli cümlelerin seçilmesini sağlar. TF-IDF yöntemi ise bir terimin belirli bir belgede ne kadar önemli olduğunu belirlemek için kullanılır [22].

Graf tabanlı yöntemlerden TextRank, graf üzerinde derecelendirme yaparak en önemli cümleleri belirleyerek bir özet oluşturur. LexRank ise PageRank benzeri bir algoritma kullanarak cümlelerin önem derecesini hesaplar. Her iki yöntem de özetleme sürecinde en anlamlı cümleleri seçmek için kullanılmaktadır [23]. Kümeleme tabanlı yöntemler, cümleleri benzerliklerine göre gruplandırarak özet oluşturmaktadır. K-Means ise cümleleri özelliklerine göre belirli sayıda kümeye ayırır ve her kümeden merkezi cümleleri seçerek özet oluşturur [24].

Semantik analiz yöntemleri, metindeki anlamsal ilişkileri inceleyerek özetleme yapar. LSA (Latent Semantic Analysis), tekil değer ayrışımı kullanarak cümleleri vektörlere dönüştürüp bu vektörler arasındaki benzerliklere göre metnin derin anlamsal yapısını analiz eder. Word2Vec/GloVe ise kelimeleri vektör uzayında temsil ederek kelimeler arasındaki bağlamsal ilişkileri öğrenir ve bu bilgiyi özetleme sürecinde kullanır [25]. Derin öğrenme tabanlı yöntemler, cümlelerin önemini belirlemek ve özetleme yapmak için farklı sinir ağı yapılarından faydalanır. DNN, CNN, LSTM ve GRU, BERT tabanlı yöntemler örnek olarak verilebilir. BERTSum ise, BERT tabanlı bir çıkarımsal özetleme yöntemidir ve metin özetleme görevleri için özelleştirilmiştir. Bu model, BERT'in cümle düzeyinde anlam yakalama yeteneğini kullanarak metindeki önemli cümleleri seçer. BERTSum, metni bir dizi cümle olarak işler ve her bir cümlenin özetleme için önemini belirler. Önem derecelerine göre sıralanmış olan cümlelerden özet oluşturur. BERTSum, diğer çıkarımsal yöntemlere göre bağlamsal anlamı daha iyi koruması ve yüksek doğruluk sağlamasıyla öne çıkmaktadır [26].

Anahtar Kelime Çıkarma

Anahtar kelime çıkarma, bir metin belgesindeki cümle öbeklerinin veya kelime öbeklerinin çıkarılması için kullanılmaktadır. Özellikle bilgi arama, belge sınıflandırma ve özetleme gibi alanlarda önemli olup, metinle ilgili anahtar bilgileri ayıklayarak verimli analiz yapılmasına olanak tanır. Kullanılan teknikler arasında istatistiksel analiz, NLP algoritmaları ve makine öğrenimi bulunur. Literatür çalışmalarında yer alan TF-IDF, RAKE, YAKE ve KeyBERT modelleri incelenmiştir. RAKE algoritması, metinlerdeki anahtar kelimeleri belirlemek için kelime frekansı ve kelime gruplarının derecelerini kullanarak etkili bir şekilde çalışır ve özellikle stop-word'leri filtreleyerek önemli kelime öbeklerini çıkarır. TF-IDF yöntemi ise, bir terimin bir metin içinde sık görülme sıklığını (TF) ve diğer metinlerde ne kadar nadir geçtiğini (IDF) değerlendirerek, kelimenin önemini istatistiksel olarak belirlemektedir [27].

Bu çalışma için metindeki cümle veya kelime öbeklerinden bağlamsal vektör temsillerinden koşullu benzerlikte en yüksek puanı alan cümle ve öbekleri anahtar kelime olarak veren KeyBERT ve metin özelliklerini kullanarak otomatik anahtar kelime çıkarımına yönelik denetimsiz bir yaklaşım kullanan YAKE algoritması kullanılmıştır.

YAKE (Yet Another Keyword Extractor), herhangi bir eğitim veri seti veya dış kaynak ihtiyacı olmadan tekil dokümanlardan yerel istatistiksel özelliklere dayalı olarak otomatik anahtar kelime çıkarımı yapan hafif ve denetimsiz bir algoritmadır. Dil ve alan bağımsızlığı ile eğitim veri setine ihtiyaç duymaması, özellikle veri eksikliği olan durumlarda tercih edilmesini sağlar. İncelenen çalışmada, YAKE, TF-IDF, RAKE ve TextRank gibi yöntemlere kıyasla daha yüksek doğruluk ve esneklik sunmuştur. YAKE modeli, beş ana adımdan oluşan bir iş akışı ile çalışmaktadır. İlk adımda metin ön işleme gerçekleştirilir ve aday terimler tanımlanır. Daha sonra, aday terimlerin istatistiksel özellikleri çıkarılır ve bu özellikler kullanılarak terimlerin önem derecesi hesaplanır. Üçüncü adımda, terimler birleştirilerek N-gram ifadeler oluşturulur ve bu ifadelerin aday anahtar kelime puanları hesaplanır. Son olarak, benzer anahtar kelimeler veri temizleme aşamasında filtrelenir ve aday anahtar kelimeler önem derecesine göre sıralanır. Bu süreç, YAKE'nin metinden bağlam bağımsız olarak en uygun anahtar kelimeleri çıkarma kabiliyetini desteklemektedir [9].

Benzerlik Değerlendirme Yöntemleri

Kelime ve Karakter Düzeyinde Benzerlik Yöntemleri

N-gram tabanlı benzerlik, istatistiksel dil modellerinde kullanılan yaygın bir uygulamadır. Yakın zamanlarda kullanılan cümle yerleştirme modelleri, unigram (kelime) yerleştirmeleri bigram yerleştirmelerle tamamlamıştır. Her iki cümle çifti için tek bir kelimeden maksimum N kelimeye kadar değişen bitişik kelime dizilerini çıkarılır ve tüm N-

gram çiftleri için bir matris oluşturulur. Oluşturulan matrisin köşegeni 1 gramı (tek kelime) temsil ederken, sağ tarafta yer alan kareler daha uzun N-gramları temsil etmektedir. Her adımda, önceki N-grama bir kelime daha eklenir. Dikkate alınması gereken maksimum N-gram boyutu bir hiperparametredir (N) ve y-x < N koşulunu sağlamaktadır. Böylece, S cümlesi için model tarafından işlenen toplam N-gram sayısı Denklem 1 gibi hesaplanmaktadır.

$$|S|.N - \sum_{i=1}^{N-1} i \quad (1)$$

N = 1 olduğunda, N-gram sayısı $|S|$ 'ye eşit olur. Yani köşegendeki eleman sayısı (N = $|S|$ sayısı) bir üst üçgendeki eleman sayısına eşittir. Tanımlanan boyut $|S|$ matrisidir ve Denklem 2'de olduğu gibi hesaplanmaktadır.

$$\sum_{i=1}^{|S|} i \quad (2)$$

N-gram modeli, bağlam bilgisini kelime tabanlı bir dikkat modeline aşılamak açısından alternatif temellerden (RNN'ler veya CNN'ler) daha üstün sonuçlar göstermiştir [7].

Benzerlik, bazı metotlarda mesafe ölçümü ilkesine dayanırken bazı metotlarda ilişki seviyesi belirlenmesi ilkesine dayanır. Yaygın olarak kullanılan bir diğer benzerlik ölçme yöntemi de Kosinüs benzerliğidir ve bu çalışmada kullanılmıştır. Kosinüs benzerliği iki vektör arasındaki kosinüs açısını çok boyutlu bir uzayda hesaplayarak vektörler arasındaki benzerliği ölçme metodudur [28]. Denklem 3' te Kosinüs benzerliği hesaplama fonksiyonu görülmektedir.

$$benzerlik = cos(\theta) = \frac{AxB}{||A||x||B||} = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_i x B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} A_i^2}\ x \sqrt{\sum_{i=1}^{n} B_i^2}} \quad (3)$$

Anlamsal Benzerlik Yöntemleri

Anlamsal metin benzerliği, iki metnin ne kadar benzer olduğunu belirlemektedir. Anlamsal benzerlik, makine çevirisi, özetleme, metin üretme, soru yanıtlama, diyalog ve konuşma sistemleri gibi pek çok uygulama alanında değerlendirme amacıyla kullanılmaktadır. Anlamsal metin benzerliği çalışmaları İngilizce'de oldukça yaygındır ve bu çalışmalar insanlar tarafından işaretleme yapılarak benzerlik ölçüt değerleri verilmiş veri kümelerine dayanmaktadır. Ancak, işaretleme yapmak maliyetli ve zaman alan bir iştir. Son zamanlarda, makine çevirilerindeki başarının artması ve çoklu dil modellerinin geliştirilmesiyle birlikte veri kümelerinin bir dilden diğerine çevrilerek kullanılması mümkün hale gelmiştir [29].

Sentence-BERT (SBERT) ile metin benzerliği, siyam ve üçlü ağ yapılarını kullanan önceden eğitilmiş BERT ağının (veya diğer transformer modellerinin) bir modifikasyonudur. Model, anlamsal olarak benzer cümleler için vektör uzayında birbirine yakın sabit boyutlu cümle gömmeleri türetmektedir. Cümleler arasındaki anlamsal benzerliği ölçmek için kullanılan BERT tabanlı bir modeldir [5]. Metinlerin anlam benzerliğini analiz etmek amacıyla tasarlanmış olan SBERT, cümle gömülülerini hesaplamaktadır (Denklem 4).

$$SBERT - göm_k = BERTModeli(Cümle_k) \quad (4)$$

Ardından bu gömülüler arasındaki kosinüs benzerliğini değerlendirmektedir (Denklem 5).

$$SBERT - Benzerlik = \frac{SBERT-göm_i \cdot SBERT-göm_j}{||SBERT-göm_i|| \cdot ||SBERT-göm_j||} \quad (5)$$

Bu cümle benzerlikleri üzerinden referans özet cümleleri ile aday özet cümleleri arasındaki anlamsal benzerlikler de ölçülebilir.

Doğal Dil İşlemede Değerlendirme Metrikleri

Metin özetleme ve makine çevirisi gibi doğal dil işleme (NLP) uygulamalarında, özetleme performansını değerlendirmek için çeşitli otomatik metrikler kullanılmaktadır. Bu metrikler, üretilen metinlerin referans metinlerle ne kadar uyumlu olduğunu ölçerek modellerin doğruluğunu ve etkinliğini belirlemeye yardımcı olur.

Çalışmada da kullanmış olduğumuz ROUGE metriği, özellikle otomatik metin özetleme sistemlerinin değerlendirilmesinde kullanılan bir metriktir. N-gram, kelime dizisi ve en uzun ortak alt dizilim (LCS) gibi ölçümlerle, sistem tarafından üretilen özetlerin referans özetlerle örtüşme derecesini değerlendirir. ROUGE'un çeşitli varyantları bulunmaktadır [30]. Bunlar şu şekildedir;

- ROUGE-N: Sistem ve referans özetler arasındaki N-gram örtüşmelerini hesaplar.
- ROUGE-L: En uzun ortak alt dizilimleri kullanarak cümle düzeyindeki benzerlikleri değerlendirir.
- ROUGE-S: Atlanmış bigramları (skip-bigram) dikkate alarak esnek kelime çiftleri arasındaki örtüşmeleri ölçer.
- ROUGE-W: Ağırlıklı LCS tabanlı istatistikleri kullanarak ardışık LCS'leri daha fazla önemser. Bu metrik, ardışık kelime dizilimlerinin önemini vurgulayarak, özetlerin referans metinle daha tutarlı olmasını sağlar [30].

ROUGE, özellikle özetleme sistemlerinin referans özetlerdeki önemli bilgileri ne kadar iyi kapsadığını belirlemede etkilidir.

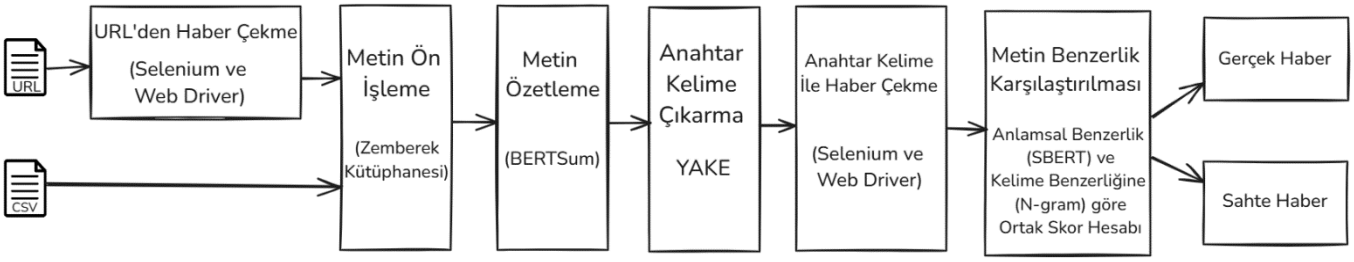
Diğer metriklere bakıldığı zaman BLEU, makine çevirisi çıktılarının kalitesini değerlendirmek için kullanılan bir metriktir ve paylaştığı N-gramlar üzerinden doğruluk skorunu hesaplayan ve çevirilerin insan çevirilerine benzerliğini ölçen bir metriktir [31]. METEOR, kelime kökleri, eş anlamlılar ve kelime sırasını dikkate alarak makine çevirisi çıktılarının referans çevirilere uyumunu ölçen ve insan yargılarıyla daha yüksek korelasyon sağlamayı amaçlayan bir değerlendirme metriğidir [32]. BERTScore, BERT gibi önceden eğitilmiş dil modellerinin bağlamsal kelime gömme temsillerini kullanarak iki metin arasındaki anlamsal benzerliği ölçen bir değerlendirme metriğidir. Bu metrik, üretilen ve referans metinler arasındaki her bir token için gömümleri karşılaştırarak benzerlik skorları hesaplar [33]. MoverScore, bağlamsal kelime gömmeleri ve EMD (Earth Mover's Distance)

yöntemini kullanarak metinler arasındaki benzerliği en düşük taşıma maliyeti üzerinden ölçen ve insan yargılarıyla yüksek korelasyon sağlayan bir değerlendirme metriğidir [34].

Bulgular ve Tartışma

Yapılan çalışma, haber sitelerinde yer alan haberleri çekip analiz ederek onların gerçek mi yoksa şüpheli mi olduğunu belirlemeye yönelik bir süreçten oluşmaktadır. Bu çalışmada sabit bir veri setine bağlı kalınmadan, güncel haber içeriklerinden yararlanılarak bir sistem tasarlanmıştır.

İncelemek istediğimiz haber, herhangi bir haber sitesinden veya sosyal medyadan yayınlanan bir haber olabilir. İncelenecek olan haber otomatik olarak çekilmekte ve işlenmektedir. Gerekli işlemler yapılan haber içeriklerinden anahtar kelimeler çıkarılmaktadır. Çıkarılan anahtar kelimelerle, güvenilir haber kaynakları olarak belirlenen Anadolu Ajansı ve Teyit.org siteleri üzerinden eşleşen içerikler aranmaktadır ve eşleşen haberler otomatik olarak çekilmektedir. Ardından benzerlik analizi gerçekleşmektedir.



Şekil 1. Şüpheli haberlerin tespiti için önerilen sistem modeli

Şüpheli haberlerin tespiti için önerilen modelin ilk aşamasında, haberlerin bulunduğu URL'lerden veya CSV dosyasına kaydedilmiş olan haber içeriklerinden oluşan bir haber verisi çekilmektedir.

CSV dosyasına kaydedilmiş olan haber içerikleri başlık, yazar, tarih, kaynak ve metin bilgilerini içermektedir. Aşağıda, bu verilerden bir haber örneğine ait içerik telif hakkı ve gizlilik nedeniyle sınırlı bir şekilde sunulmuştur:

"Gazeteciler 1 Nisan şakası yaparsa ne olur ?

Gaye Güllü / 31.03.2025

İstanbul

1 Nisan, dünya genelinde şaka günü olarak kutlanıyor. Bazı kaynaklar bu şaka geleneğinin 16. yy.'da Fransa'da …"

Tam haber içerikleri sistem tarafından özetleme ve anahtar kelime çıkarma işlemleri için kullanılmıştır. Yukarıda sadece temsil edici örnek gösterilmiştir.

URL'den çekilecek haberler için Selenium ve Web Driver kullanılarak tarayıcı otomasyonu sağlanmakta ve haber metinleri otomatik olarak alınmaktadır. Çekilen haber metinleri daha sonra Zemberek kütüphanesi ile ön işleme tabi tutulmaktadır. Ön işlemlerde gereksiz kelimeler çıkartılır ve metin doğal dil işleme için sadeleştirilerek optimize edilmiş olur.

Metin ön işlemeden geçen haberler, BERT tabanlı bir özetleme yöntemi olan BERTSum ile özetlenmektedir. Bu yöntem, metnin ana fikirlerini seçerek daha kısa bir özet oluşturmaktadır. Böylece sonraki analizlerin hızını artırmaya yardımcı olmaktadır. Aşağıda yer alan Tablo 1'de, denenmiş olan farklı çıkarımsal özetleme yöntemlerinin ROUGE metriklerine göre karşılaştırması gösterilmektedir. Sunulan verilere göre, ROUGE-1, ROUGE-2 ve ROUGE-L metrikleri, özetlerin orijinal metinle örtüşme düzeyini farklı açılardan değerlendirmektedir. ROUGE-1, özetlerin tekil kelime seviyesindeki örtüşmesini ölçerken, ROUGE-2 daha bağlamsal detayları ve cümle yapısını analiz etmektedir. ROUGE-L ise metin uyumunu ve dil bilgisel doğruluğu değerlendirerek en uzun ortak kelime dizilerini ölçmektedir. Bu üç metrik birlikte değerlendirildiğinde, özetleme yöntemlerinin yüzeysel doğruluğunu ve bağlamsal derinliğini anlamak için kapsamlı bir araç sunulmaktadır [30].

Tablo 1. Çıkarımsal özetleme yöntemlerinin ROUGE değerlerine göre karşılaştırılması

Çıkarımsal Özetleme Yöntemleri	ROUGE-1	ROUGE-2	ROUGE-L
BERTSum	41.81	27.77	32.72
K-Means	40.23	17.96	24.85
TextRank	39.54	17.14	19.20
LexRank	39.75	12.57	26.08
TF-IDF	39.75	20.12	26.08
LSA	35.52	12.86	20.80

BERTSum'un özellikle ROUGE-2 ve ROUGE-L metriklerindeki üstün performansı, bağlamsal ilişkileri ve metin detaylarını etkili bir şekilde kavradığını göstermektedir. TF-IDF ve LexRank yöntemleri, ROUGE-1 skorlarında iyi performans sergilemesine rağmen, ROUGE-2 skorlarında daha düşük sonuçlar elde ederek metin bağlamını derinlemesine anlamakta sınırlı olduklarını göstermektedir. LSA yöntemi, özellikle ROUGE-2 ve ROUGE-L metriklerinde en düşük performansı göstermiştir, bu da anlamsal bağlamı yeterince yakalayamamasından kaynaklanmaktadır. TextRank ve K-Means yöntemleri, genel anlamı özetlemede başarılı olurken, bağlamsal ve ayrıntılı analiz gerektiren ROUGE-2 metriklerinde daha sınırlı kalmıştır. Diğer yöntemlerin aksine, BERTSum tüm metriklerde en yüksek performansı göstermiş ve özellikle ROUGE-2 ve ROUGE-L skorlarındaki üstünlüğüyle bağlamsal anlamayı ve metin detaylarını etkili bir şekilde kavradığını kanıtlamıştır. BERTSum'un derin öğrenme tabanlı yapısı ve önceden eğitilmiş güçlü BERT modelini kullanması, metinlerin bağlamını ve dil bilgisel doğruluğunu olağanüstü bir şekilde anlamasına olanak tanımaktadır. Özetlenen metinlerden anahtar kelimeler YAKE algoritması kullanılarak çıkarılmaktadır. Elde edilen anahtar kelimeler kullanılarak, güvenilir olarak belirlenen haber sitelerinden ilgili haberler tekrar çekilmektedir. Bu sayede model, benzer içerikleri karşılaştırmak için ilgili haberleri otomatik olarak bulmaktadır. Özetlenmiş olan metinlerin benzerlik hesaplamalarında kullanılan yöntemler arasında farklı performans seviyeleri bulunmaktadır. N-gram yöntemi kelime bazlı benzerlik analizi yaparak daha hızlı sonuçlar sunmaktadır. Fakat anlamsal bağlamı değerlendirmemektedir. SBERT yöntemi, anlamsal benzerlikleri bağlamsal olarak yakalayarak yüksek doğruluk sağlar ve özellikle uzun metinlerde güçlü bir performans gösterir. Bu durum, her yöntemin güçlü ve zayıf yönlerinin olduğunu ve tek bir yöntemle her türlü metin benzerliğinin doğru bir şekilde değerlendirilmesinin zor olduğunu göstermektedir. Çalışmada önerilen Ortak Skor hesabıyla, SBERT, N-gram ve Kosinüs yöntemlerini birleştirerek daha dengeli bir benzerlik ölçümü sunulmuştur. Tablo 2' de çeşitli yöntemlerin sonuçlarına dayanarak her birinin farklı avantajlar sunduğu görülmektedir.

Tablo 2. Metin benzerliği ölçüm yöntemlerinin başarı metriklerine göre karşılaştırması

Model	Kesinlik	Duyarlılık	F1 Skor
Ortak_score	0.90	0.85	0.87
BERT_score	0.85	0.80	0.82
Word2Vec	0.80	0.75	0.77
N-Gram	0.78	0.70	0.74
SBERT	0.88	0.82	0.85
TD-IDF	0.75	0.68	0.71

İncelenen haber metniyle anlamsal olarak benzer, farklı ve alakasız haber metinleri seçilerek derlenmiş ve modeller üzerinde skor hesaplaması yapmak için test edilmiştir. Metin benzerlik yöntemlerinin başarımını değerlendirmek amacıyla; Kesinlik, Duyarlılık ve F1 Skor gibi yaygın olarak kullanılan metrikler kullanılmıştır.

Kesinlik, gerçek değeri pozitif olup pozitif olarak sınıflandırılan tahmin sayısının tahmin değeri pozitif olan tüm gözlemlere oranıdır. En kötü kesinlik değeri 0 iken, en iyi kesinlik değeri 1 değerine sahiptir. Duyarlılık, gerçek değeri pozitif olan değerlerin ne kadarının pozitif olarak etiketlendiğini gösterir. Gerçek pozitif sayısı ne kadar fazla

olursa duyarlılık değeri artarken yanlış negatif sayısı ne kadar fazla olursa bu sefer de duyarlılık değeri azalır. F1 skoru, modelin kesinlik ve duyarlılık değerlerinin harmonik ortalaması alınarak hesaplanır. F1 skoru 0 ile 1 arasında değer almaktadır. F1 skoru değeri 1'e yaklaştıkça kategorizasyon sonuçları da o kadar doğru olmaktadır [34]. F1 skorunun harmonik ortalamasının hesaplanması ile ortak skorun sınır değeri belirlenmiştir ve denklem 6' da verilmiştir.

$$F1 = 2x\frac{Kesinlik\ x\ Duyarlılık}{Kesinlik\ +Duyarlılık} \quad (6)$$

Tablo 2'de hesaplanan değerlere göre Ortak Skor değerlerinin diğer modellere göre daha iyi başarım gösterdiği gözlenmiştir. Ortak Skor hesabı, SBERT'in bağlamsal anlam yakalama gücünü, N-gram'ın yüzeysel yapıları değerlendirme becerisini ve Kosinüs benzerliğinin matematiksel sağlamlığını bir araya getirmektedir. Böylece, hem metnin semantik anlamı hem de yüzeysel benzerliği değerlendirilerek daha güvenilir ve kapsamlı bir sonuç elde edilmiştir. Özellikle bağlamsal ve yüzeysel benzerliğin aynı anda önemli olduğu uygulamalarda, önerilen yöntemin daha üstün performans göstermesi beklenmektedir. Bu nedenle Ortak Skor yöntemi, yalnızca doğruluk açısından değil, aynı zamanda farklı yöntemlerin güçlü yönlerini birleştirerek güvenilirlik ve uygulama kolaylığı açısından da tercih edilmelidir.

Haberlerin doğruluğunu analiz etmek için, orijinal haber ile çekilen haberler arasındaki benzerlikler karşılaştırılmaktadır. Bu adımda iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Anlamsal benzerlik için SBERT ve kelime benzerliği N-gram yöntemleri kullanılmaktadır. SBERT modeli ile metinlerin anlamsal benzerliği karşılaştırılmıştır. Metindeki kelime benzerliğini hesaplamak için de N-gram benzerlik ölçütü kullanılmıştır. Bu iki yöntemden elde edilen sonuçlara göre bir ortak skor hesaplanmaktadır. Ortak Skor hesabı Denklem 7'de verilmiştir.

$$Ortak\ Skor = (K.S.\ \times K.A.) + (A.S.\ \times A.A.) \quad (7)$$

Denklem 7, çalışmaya özgü olarak geliştirilen Ortak Skor tabanlı karar mekanizmasına aittir. Literatürdeki benzerlik ölçütlerinden farklı olarak, kelime düzeyinde ve anlamsal düzeyde elde edilen sonuçları ayrı ayrı değerlendirip bunları belirli ağırlıklarla birleştirerek nihai doğruluk kararını üretmektedir. Ortak Skor, Kelime Skor (*K.S.*) ve Kelime Ağırlığının (*K.A.*) çarpımı ile Anlamsal Skor (*A.S.*) ve Anlamsal Ağırlığın (*A.A.*) çarpımlarının toplamı ile hesaplanmaktadır. Kelime Ağırlığı ve Anlamsal Ağırlık değerleri, metnin anlamsal ve yapısal bağlamının önemine göre değiştirilebilmektedir. Bu projede, haber metni türleri için anlamsal bağlamın daha önemli olduğu göz önünde bulundurularak Anlamsal Ağırlık için 0.7 ağırlığı ve Kelime Ağırlığı için ise 0.3 ağırlığı kullanılmıştır. Son aşamada SBERT, N-gram ve Kosinüs benzerliği yöntemleri kullanılarak tanımlanan Ortak Skor değeri, denklem 6' da belirlenen F1 skorunun harmonik ortalamasına göre hesaplanan değerden büyükse metinlerin benzer olduğu ve haberin gerçek olduğu, ortak skor değeri hesaplanan değerden küçükse metinlerin benzer olmadığı ve haberin sahte olduğu sonucuna varılmaktadır. Böylece önerilen model, haberlerin doğruluğunu belirlemek için metin işleme, özetleme, anahtar kelime çıkarma ve benzerlik analizini bir arada kullanarak otomatik bir doğrulama süreci sunmaktadır. Güncel olaylarla ilgili yanıltıcı içeriklerin tespitini hızlandırarak, kamuoyunun doğru bilgiye ulaşmasını ve ulusal güvenlik açısından risk taşıyan manipülatif girişimlerin önlenmesini sağlamaktadır.

Tablo 3. Literatürdeki çalışmalarla karşılaştırma sonuçları

Kaynak	Veri Seti	Yöntem	F1 Skoru
12	Twitter-SPO-KnowledgeBase	BERT, LSTM, RNN	84%
15	Etiketsiz Sosyal Medya Verisi	Weakly Supervised SVM, Bi-LSTM, TF-IDF	85%
2	Twitter Türkçe Haberler	KNN, SVM, K-Means, LDA	86%
Önerilen Model	Gerçek Zamanlı Veri (Anadolu Ajansı, Teyit.org)	BERTSum, YAKE, SBERT, N-Gram (Ortak Skor Yöntemi)	87%

Önerilen sistemin performansı, literatürdeki benzer çalışmalarda sunulan yaklaşımlarla karşılaştırılmıştır. Yukarıda verilen Tablo 3 incelendiğinde, sabit veri kümeleri ile eğitilen geleneksel makine öğrenmesi ve derin öğrenme modellerine kıyasla önerilen modelin daha yüksek F1 Skor değerine ulaştığı görülmektedir. Özellikle, gerçek zamanlı

ve dinamik veri akışı üzerinden çalışabilmesi sayesinde, önerilen sistem yalnızca doğruluk açısından değil, aynı zamanda uygulanabilirlik ve güncellik açısından da avantaj sunmaktadır. Diğer çalışmalarda genellikle sabit ve etiketlenmiş veri setleriyle çalışıldığı görülürken, bu çalışmada haber içeriklerinin doğrudan kaynaklardan çekilmesi ve otomatik analiz edilmesi, sistemi pratikte daha esnek ve etkili kılmaktadır. Ayrıca önerilen modelin Anadolu Ajansı ve Teyit.org gibi güvenilir kaynaklardan elde edilen güncel verilerle desteklenmesi, sahte haber tespitinde gerçek zamanlı karar destek sistemleri açısından önemli bir avantaj sunmaktadır.

Sonuçlar

Bu çalışmada, dijital medyada hızla yayılan sahte haberlerin etkili bir şekilde tespit edilmesi amacıyla derin öğrenme ve doğal dil işleme (NLP) tabanlı yenilikçi bir haber teyit sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen sistem, dijital haber içeriklerinin güvenilirliğini analiz ederek kullanıcıları yanlış bilgilendirme riski taşıyan içeriklere karşı korumayı hedeflemiştir. Çalışmada sabit bir veri seti kullanılmasının yerine, sistemin güncel ve gerçek zamanlı veriyle çalışması hedeflenmiştir. Anadolu Ajansı ve Teyit.org gibi güvenilir haber kaynaklarından otomatik olarak çekilen haber içerikleri doğrultusunda değerlendirmeler yapılmıştır. Özellikle anlık sahte haber tespiti hedeflendiğinden, sistemin performansı dinamik veriler üzerinden, güncel haber akışlarıyla değerlendirilmiştir.

Sistem, haber metinlerini hem yüzeysel hem de anlamsal düzeyde analiz ederek şüpheli içeriklerin belirlenmesine olanak sağlamıştır. Bu kapsamda, SBERT ve YAKE gibi modellerin kullanılması, metinlerin derin anlamsal özelliklerinin çıkarılmasına ve anahtar kelimelerle yüzeysel benzerliklerin etkili bir şekilde ölçülmesine olanak tanımıştır. SBERT modeli, metinler arasındaki derin anlamsal ilişkileri anlamada güçlü bir araç olarak öne çıkmıştır. SBERT'in bağlamsal anlamı yüksek doğrulukla yakalayabilmesi, sahte haberlerin tespitinde yanlış pozitif oranlarını düşürmüştür. YAKE algoritmasının eğitim veri setine ihtiyaç duymadan çalışabilmesi, sistemin daha esnek ve uygulanabilir olmasını sağlamıştır. N-gram benzerliği gibi yöntemlerle derin öğrenme modellerinin bir arada kullanılması, sahte haber tespitinin doğruluk oranını önemli ölçüde artırmıştır.

Kullanılan yöntemin bir diğer önemli avantajı, belirli veri setleriyle sınırlı kalmayıp güncel haberler üzerinde çalışabilmesidir. Bu sistem, anlık veri çekme özelliği sayesinde haberlerin en hızlı şekilde doğrulanmasını sağlamaktadır. Güncel olaylara yönelik sahte haberlerin gerçek bilgilerle kıyaslanarak hızla tespit edilmesi, özellikle kriz anlarında yanlış bilgilendirmenin önüne geçmek açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu özellik, sistemin yalnızca tarihsel veri kümeleriyle değil, dinamik ve sürekli değişen haber içerikleriyle çalışmasını mümkün kılmakta, böylece sahte haber tespit süreçlerinin etkili bir şekilde gerçek zamanlı olarak yürütülmesini sağlamaktadır. Çalışmanın sonuçları, önerilen sistemin sahte haberlerin tespiti konusunda yüksek başarı elde ettiğini göstermiştir. Metin işleme, özetleme ve benzerlik analizi gibi birden fazla yöntemi entegre eden bu sistem, hem bireysel kullanıcılar hem de toplumsal düzeyde fayda sağlamayı hedeflemiştir. Modelin, hem büyük veri kümelerinde çalışabilmesi hem de süreçlerin otomatikleştirilmesi, manuel doğrulama yöntemlerinin zaman ve ölçekleme sorunlarına etkili bir çözüm sunmuştur. Bununla birlikte, güvenilir kaynaklardan alınan bilgilerle desteklenen çok katmanlı bir doğrulama süreci, sistemin sağlamlığını ve güvenilirliğini artırmıştır.

Bu çalışmanın ilerleyen aşamalarında, geliştirilen sistemin çok dilli bir yapıya uyarlanarak farklı dillerdeki haberlerin doğrulanmasında kullanılabilecek şekilde genişletilmesi hedeflenmektedir. Özellikle uluslararası medya kaynaklarındaki sahte haberlerin tespiti için, çok dilli derin öğrenme modellerinin (mesela, mBERT) entegrasyonu önerilebilir. Modelin farklı sahte haber veri setleriyle karşılaştırmalı olarak test edilmesi de planlanmaktadır. Böylece önerilen yapının farklı içerik türlerinde ve çok dilli ortamlarda da geçerliliği değerlendirilebilecektir. Ek olarak, sistemin sadece metin analizine dayalı bir yapıdan çıkarılarak, görsel ve video içeriklerin de analiz edilebileceği çok modaliteli bir doğrulama sistemi haline getirilmesi mümkündür. Bu tür bir geliştirme, özellikle sosyal medya platformlarında yaygınlaşan manipülatif görsel ve video içeriklerin tespitinde etkili bir çözüm sunabilir.

Sonuç olarak, geliştirilen haber teyit sistemi, toplumun doğru bilgiye erişimini kolaylaştıran, ulusal güvenlik risklerini azaltan ve sahte haberlerin etkilerini en aza indiren yenilikçi bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Dijital medyanın giderek daha fazla önem kazandığı günümüzde, bu tür sistemlerin geliştirilmesi, bireylerin ve toplumların bilgi güvenliği açısından büyük bir öneme sahiptir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur ve herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yazar Katkıları

Nurcan Yardımcı: Model tasarımı, deneysel çalışma, veri toplama, metodoloji, taslak hazırlama ve revizyon.

Hatice Karaoğlu: Veri ön işleme, deneysel çalışma, veri toplama, metodoloji ve taslak hazırlama.

Burhan Ergen: Denetleme, teorik katkı, düzenleme ve metodoloji.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK 1002-A Hızlı Destek Modülü, 124E844 numaralı proje kapsamında desteklenmektedir.

Kaynaklar

[1] M. F. Çömlekçi, "Sosyal medyada dezenformasyon ve haber doğrulama platformlarinin pratikleri," *Gümüşhane Üniversitesi İletişim Fakültesi*

Elektronik Dergisi, vol. 7, no. 3, pp. 1549-1563, Dec. 2019.

[2] S. G. Taşkın, E. U. Küçüksille, and K. Topal, "Twitter üzerinde Türkçe sahte haber tespiti," *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 23, no. 1, pp. 151-172, 2021, DOI:10.25092/baunfbed.843909

[3] A. M. Kırık, and N. Samadli, "Fake News Spread in Online Media During The Second Karabakh War" *RESS Journal*, vol. 11, no. 5, pp. 97-108, Sep. 2024, DOI: 10.17121/ressjournal.3571.

[4] S. S. Akyüz, and M. Özkan, "Kriz Dönemlerinde Enformasyon Süreçleri: Ukrayna-Rusya Savaşında Dolaşıma Giren Sahte Haberlerin Analizi" *Uluslararası Kültürel ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, vol. 8, no. 2, pp. 66-82, Dec. 2022, DOI: 10.46442/intjcss.1213993.

[5] N. Reimers, and I. Gurevych "Sentence-BERT: Sentence Embeddings using Siamese BERT-Networks" *arXiv preprint arXiv vol. 1908, pp. 10084*, Aug. 2019.

[6] Y. Chu *et al.,* "Refined SBERT: Representing sentence BERT in manifold space," *Neurocomputing*, vol. *555*, pp. 126453, Jul. 2023.

[7] I. Lopez-Gazpio *et al.,* "Word n-gram attention models for sentence similarity and inference," *Expert Systems with Applications*, vol. 132, pp. 1-11, Apr. 2019.

[8] M. Sudhakar, and K. P. Kaliyamurthie, "Detection of fake news from social media using support vector machine learning algorithms," *Measurement: Sensors*, vol. 32, pp. 101028, Feb. 2024.

[9] R. Campos, *et al.,* "YAKE! Keyword extraction from single documents using multiple local features," *Information Sciences*, vol. 509, pp. 257-289, Sep. 2019.

[10] Z. Xu, and J. Zhang, "Extracting keywords from texts based on word frequency and association features," *Procedia Computer Science*, vol. 187, pp. 77-82, 2021.

[11] G. Yavuz, "Web kazıma ve duygu analizi temelli ürün analiz sistemi/Web scraping and sentiment analysis based product analysis system," M.S. thesis, Aksaray Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, 2023.

[12] V. Nair, J. Pareek, and S. Bhatt, "A Knowledge-Based Deep Learning Approach for Automatic Fake News Detection using BERT on Twitter," *Procedia Computer Science*, vol. 235, pp. 1870-1882, 2024.

[13] M. N. Awan, and M. O. Beg, "Top-rank: a topicalpostionrank for extraction and classification of keyphrases in text," *Computer Speech & Language*, vol. 65, pp. 101116, Jun. 2020.

[14] E. Ş. Dinçer, D. Kayaoğlu, and S. Safarlı, "Metin madenciliği ve duygu analizi ile siber zorbalık tespiti," *Eskişehir Türk Dünyası Uygulama ve Araştırma Merkezi Bilişim Dergisi*, vol. 3, no. 2, pp. 38-45, Apr. 2022.

[15] L. Syed, *et al.,* "Hybrid weakly supervised learning with deep learning technique for detection of fake news from cyber propaganda," *Array*, vol. 19, pp. 100309, Jul. 2023.

[16] G. K. Koru and Ç. Uluyol, "Detection of Turkish fake news from tweets with BERT models," *.IEEE Access,* vol. 12, pp. 14918-14931, 2024, DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3354165

[17] F. A. Özbay and B. Alataş, "Çevrimiçi sosyal medyada sahte haber tespiti," *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, vol. 11, no. 1, pp. 91-103, 2020, DOI: 10.24012/dumf.629368

[18] İ. Kulaksız, "Doğal Dil İşleme Kullanılarak Ana Akım Medyada Türkçe Sahte Haber Tespiti" Yüksek Lisans Tezi, Bilgisayar Mühendisliği ABD, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye, 2025.

[19] N. Z. KAYALI and S. İ. OMURCA, "Candidate Summary Elimination Approach for Turkish Hybrid Text Summarization," *Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU)*, pp. 1-6, 2024, DOI: 10.1109/ASYU62119.2024.10756999.

[20] T. Uçkan, and K. Karabulut, "The Effectiveness of Machine Learning Algorithms in Extractive Text Summarization: A Comparative Analysis of K-Means, Random Forest, GBM, Logistic Regression, and SVM," *Doğu Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 7 no. 2, pp. 77-91, 2024, DOI: 10.57244/dfbd.1538959.

[21] A. Nenkova, and K. McKeown, "A survey of text summarization techniques," *Mining text data*, pp. 43-76, Jan. 2012.

[22] A. C. Akdeniz, "*Makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak uzaktan eğitim konulu Türkçe tweetlerin duygu analizi,*" M.S. thesis, Konya Teknik Üniversitesi, Apr. 2022.

[23] C. Hark, *et al.,* "Metin özetlemesi için düğüm merkezliklerine dayalı denetimsiz bir yaklaşım," *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 8, no.3, pp. 1109-1118, 2019.

[24] A. İ. Kısayol, and M. Turan, "Paragraf Tabanlı Çıkarımsal Özetlemede Öbekleme Kullanan İki Yeni Yöntemin Kıyaslanması," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, vol.6, no. 4, pp. 1047-1057, 2018.

[25] G. Soğancıoğlu, "*A semantic sentence similarity estimation approach for the biomedical domain,"* Doctoral dissertation, Boğaziçi University, 2013.

[26] Y. Liu, and M. Lapata, "Text summarization with pretrained encoders," *arXiv preprint arXiv* 1908.08345, Sep. 2019.

[27] A. S. Birdevrim, A. Boyacı, and D. A. S. Al Thani, "İYİLEŞTİRİLMİŞ OTOMATİK ANAHTAR KELİME ÇIKARIMI BRAKE," *İstanbul Ticaret Üniversitesi Teknoloji ve Uygulamalı Bilimler Dergisi*, vol. 1, no. 1, pp. 11-19, 2018.

[28] A. Çelikten, H. Bulut, and A. Onan, "A semantic Similarity-Based approach to extract respiratory disease-symptom relations from biomedical literature," *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 40, no. 1, pp. 121-134, 2025.

[29] L. Soykan, C. Karsak and İ. D. El-Kahlout, "Adult Content Detection in Search Engine Queries," *2022 30th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, pp. 1-4, 2022, DOI: 10.1109/SIU55565.2022.9864759.

[30] A. Karaca, and Ö. Aydın, "Transformatör mimarisi tabanlı derin öğrenme yöntemi ile Türkçe haber metinlerine başlık üretme," *Gazi Üniversitesi*

Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, vol. 39, no. 1, pp. 485-496, 2024, DOI: 10.17341/gazimmfd.963240

[31] E. Erdağı, and V. Tunali, "Comparison of feature-based sentence ranking methods for extractive summarization of turkish news texts," *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, vol. 42, no. 2, pp. 321-334, Apr. 2024, DOI: 10.14744/sigma.2023.00076.

[32] S. D. Myla, E. R. Saini and E. N. Kapoor, "Auto Text Summarization in Natural Language Processing: Review," *2nd International Conference on Intelligent Data Communication Technologies and Internet of Things (IDCIoT)*, pp. 1258-1267, Jan. 2024, DOI: 10.1109/IDCIoT59759.2024.10467376.

[33] T. Zhang, *et al.,* "Bertscore: Evaluating text generation with bert," *arXiv preprint arXiv:1904.09675*, 2019.

[34] W. Zhao, *et al.,* "MoverScore: Text generation evaluating with contextualized embeddings and earth mover distance," *arXiv preprint arXiv:1909.02622*, Sep. 2019.

[35] D. Demirbilek and M. Ersoy, "Sosyal Medya Paylaşımlarında Karar Mekanizmalarının Öğrenme Algoritmalarıyla Karşılaştırmalı Analizi," *Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi*, vol. 8, no. 1, pp. 8–25, 2024, DOI: 10.62301/usmtd.1462808.

Dicle University
Journal of Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/dumf
duje.dicle.edu.tr

Research Article

Enhanced Earthquake Magnitude Prediction Using Hybrid Machine Learning and Deep Learning Models

Kerem GENCER[1], İnayet Hakkı ÇİZMECİ[2]*

[1] Afyon Kocatepe University, Computer Engineering Department, keremgencer09@hotmail.com, Orcid No: 0000-0002-2914-1056
[2] Afyon Kocatepe University, Computer Engineering Department, icizmeci@aku.edu.tr, Orcid No: 0000-0001-6202-4807

ARTICLE INFO

Article history:

Received 24 March 2025
Received in revised form 21 May 2025
Accepted 16 June 2025
Available online 30 June

Keywords:

Deep Learning, Artificial Intelligence, Transformers, Earthquake Prediction

DOI: 10.24012/dumf.1663473

* Corresponding author

ABSTRACT

This study evaluates the performance of machine learning and hybrid deep learning models for predicting earthquake magnitudes using historical seismic data. Five models, including Random Forest (RF), ARIMA, Long Short-Term Memory (LSTM), CNN+LSTM, and Transformer + Gaussian Processes (GP), were compared using metrics such as Root Mean Squared Error (RMSE) and R^2. The RF model was quite efficient, with an RMSE of 0.072 and an R^2 of 0.30. However, it did not incorporate temporal analysis. ARIMA was also better, with an RMSE of 0.065 and R^2 of 0.42, which is best suited for linear relationships. LSTM identified the sequential relations well and provided an RMSE of 0.097 and R^2 of 0.51. The hybrid CNN+LSTM model outperformed standalone approaches with an RMSE of 0.090 and R^2 of 0.58 by combining spatial and temporal features. The Transformer + GP model achieved the highest accuracy, with an RMSE of 0.063 and R^2 of 0.62, offering robust uncertainty quantification through confidence intervals. These results highlight the superiority of hybrid models in seismic forecasting, demonstrating their potential to improve predictive accuracy and support better risk management strategies.

Introduction

Earthquakes are natural disasters that cause societies to suffer socioeconomic losses, stop human activities, and disrupt physical structures [1]. When we look at Turkey's history, it is known that it has witnessed many destructive earthquakes. The main reason for destructive earthquakes is that the country is in the 1st degree earthquake zone. In addition, the fact that the city centers, where people live densely, are established on or near the live fault lines known as fractures have also increased the destructive effect [2] (Fig. 1).

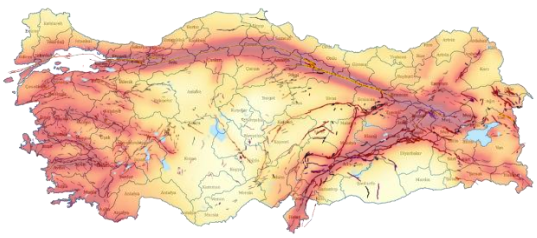


Figure 1. Active fault lines in Turkey (AFAD)

AFAD's report shows that earthquakes cause 60 percent of disaster-related deaths. In 2023, a devastating earthquake of 7.6 Mw occurred in Kahramanmaraş [3]. In the earthquake, 44,218 people died, 80,278 people were injured, and 528,146 people were evacuated to other cities [4]. Knowing the earthquake's magnitude is very important to prepare for such situations. Traditional techniques such as ARIMA are used to detect linear trends in forecasting procedures. However, the proposed methods cannot cope with the difficulties associated with irregular and non-linear seismic data. New forecasting methods can be developed using machine learning and deep learning techniques to extract features and learn temporal patterns. The main work in this field in the last five years has been presented in Table 1.

This study investigates the performance of Machine learning models (Random Forest, ARIMA), Deep learning models (LSTM), and Hybrid architecture (CNN+LSTM, Transformer + GP).

The specific contributions of this research include:

1. Comparing classical statistical models like ARIMA with modern machine learning techniques.

2. Implementing hybrid models such as CNN+LSTM and Transformer + Gaussian Processes for improved accuracy.

3. Incorporating real-time uncertainty estimation using Gaussian Processes.

We aim to evaluate these models using historical earthquake data and provide insights into their strengths and limitations.

Table 1. Major studies for earthquake prediction in the last five years

Researcher (Year)	Method	Objective	Results
Bhandarkar et al. (2019) [5]	LSTM, FFNN	Comparison of earthquake prediction methods	LSTM achieved a 59% better R^2 score than FFNN.
Doğan and Demir (2020) [6]	Structured Recurrent Neural Network (SRNN)	Predicting earthquakes with magnitude four or above in Turkey in a one-month period.	0.72 accuracy and 0.74 precision were obtained.
Li et al. (2020) [7]	CNN, Attention Mechanism (DLEP Model)	Improving earthquake prediction by combining explicit and implicit seismic properties	The DLEP model outperformed the baseline methods.
Berhich et al. (2020) [8]	LSTM, YSA	Performance comparison of ANN and LSTM for earthquake prediction	ANN: MAE 0.30, MSE 0.13; LSTM: MAE 0.11, MSE 0.02 error rates were achieved.
Karcı and Şahin (2022) [9]	LSTM	Estimation of earthquake magnitude and timing	Kalaba-Sivrice and Izmir earthquakes were predicted with 91% and 93% accuracy.
Bhargava and Pasari [10]	LSTM, YSA	Earthquake forecast in the Himalayan region	It is effective in small-scale regions, but insufficient results were obtained for large earthquakes.
Demirelli et al. (2023) [3]	Random Forest, Extreme Gradient Boosting, Decision Trees, k-NN	Earthquake prediction with seismic, geological and geodetic data.	RF and XGB gave the best results with 0.09 MSE.
Doğan (2023) [11]	SVM, Linear Regression, Gradient Boost, Elastic Net, Bayesian Ridge, XGBoost	Estimating earthquake locations and depths in north-western Turkey	Potential high-magnitude earthquake zones were evaluated with RMSE, MAE, and Adjusted R^2.
Kavianpour et al. (2023) [12]	CNN, BiLSTM, Attention Mechanism	Estimating the maximum magnitude and number of earthquakes in different regions in China	The proposed model gave better results compared to other methods.
Ridzwan and Yusoff (2023) [13]	Machine Learning Algorithms	Comparing the effectiveness of different algorithms by analysing 31 studies in 2017-2021	It provided insights into the effectiveness of seismic features and the performance of algorithms.

When the studies presented in Table 1 are examined, certain trends and common findings are observed in the research on earthquake prediction. Deep learning-based methods, especially LSTM models, consistently demonstrate superior performance compared to traditional artificial neural networks and statistical methods. In 2019, Bhandarkar et al. reported that LSTM achieved 59% better R^2 score than FFNN, and in 2020, Berhich et al. reported that LSTM offered significantly lower error rates (MAE 0.11, MSE 0.02) than ANN. Hybrid and advanced models, such as CNNs and attention mechanisms [7][12], provide better results than single-method models. However, the effectiveness of the models varies according to their geographical scope. Although they perform better in small-scale regions, they can also predict large earthquakes in large regions [10]. Ensemble methods such as Random Forest and XGBoost have shown strong performance in studies combining different data types (seismic, geological, geodetic) [3]. Consequently, the most promising approaches for earthquake prediction are deep learning methods, but the prediction accuracy remains highly

dependent on the regional context, data quality, and estimated parameters (magnitude, timing, or location).

Materials and methods

Data description

In this study, the earthquake data set recorded by the Disaster and Emergency Management Presidency (AFAD) between 1990 and 2024, with magnitudes between 3 and 6.5 (3447 earthquakes), epicenter in Afyonkarahisar (38.7580, 30.5387), and epicenter distances between 100 km and 150 km (Figure 2). The dataset obtained from AFAD includes various descriptive features for each earthquake event. Specifically, it contains the earthquake ID, date and time of occurrence, latitude, longitude, and depth (in kilometers). Additionally, it provides multiple magnitude scales such as MD (Duration Magnitude), ML (Local Magnitude), Mw (Moment Magnitude), Ms (Surface-Wave Magnitude), and Mb (Body-Wave Magnitude). The dataset also includes the earthquake type and the location name. These variables were used to construct a time-series dataset for training the models, and the ML (Local Magnitude) value was selected as the primary target variable for prediction.

Afyonkarahisar contains 31 live fault lines. The maximum earthquake magnitudes that these fault lines can produce are between 6.18 and 6.86 M_w [14].

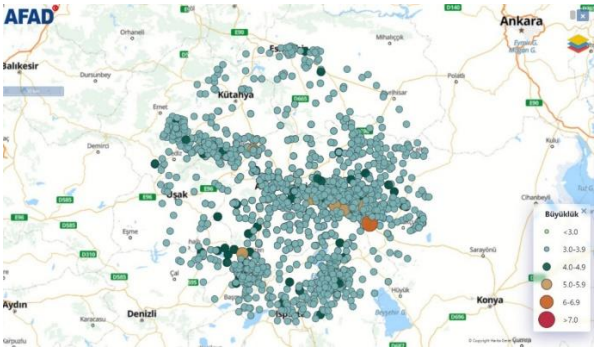


Figure 2. Map of earthquakes within a radius of 150 km, centered in Afyonkarahisar

Moment magnitude scale M_w and Richter local magnitude scale M_L indicate earthquake magnitudes. It has been observed that the scale reaches saturation in high-magnitude earthquakes ($M_L \geq 6$). Conversely, Mw is a scale widely used in large earthquakes, and its structure is more stable [15]. Since there are no earthquakes exceeding magnitude 6 in this dataset, the local magnitude scale M_L was selected for use in the calculations.

The dataset includes earthquake records with magnitude (M_w), converted to Local Magnitude (M_L) using the Equation (1).

$$M_L = 0.67\ x\ M_w + 1.45 \quad (1)$$

The data spans multiple years and provides magnitudes for various earthquake events, processed into a time series format [16], [17].

Preprocessing

Missing values in magnitude data were handled using mean imputation. The data was normalized for deep learning models using Min-Max scaling. Features (x) and labels (y) were generated with a rolling window of five years for sequential models.

Models implemented

- **Random forest (RF)**

Random Forest is an ensemble learning method based on decision trees. It was optimized using GridSearchCV to find the best parameters for estimators, depth, and leaf samples. Evaluation metrics include $RMSE$ and R^2 [18].

- **ARIMA**

The ARIMA model analyzes time series data using autoregressive and moving average components. After performing a stationarity (ADF) test, differences were applied for non-stationary series. The model parameters (p,d,q) were selected based on AIC [19].

- **LSTM**

LSTM networks are recurrent neural networks designed to model sequential dependencies: Input shape (timesteps, features), hidden layers including 50 LSTM units with dropout for regularization. The model was trained using the Adam optimizer and mean squared error as the loss function [20].

- **CNN+LSTM hybrid**

Combining CNN for spatial feature extraction with LSTM for temporal dependencies: CNN branch: Two Conv1D layers with ReLU activation followed by a flattening layer: Two LSTM layers with dropout. The final layers were concatenated and fed into dense layers for prediction [21]. The hybrid CNN+LSTM model consists of two main branches. The CNN branch begins with two consecutive 1D convolutional layers, with 32 and 64 filters respectively, both using a kernel size of 2 and ReLU activation function. These layers are followed by a flattening operation. The LSTM branch includes two stacked LSTM layers, each with 50 units; the first returns sequences while the second outputs the final hidden state. The outputs of both branches are concatenated and passed through a dense layer with 50 units and ReLU activation, followed by a dropout layer with a rate of 0.2 to prevent overfitting. Finally, a dense layer with a single unit is used for the regression output.

- **Transformer + Gaussian processes**

This hybrid model leverages Transformers for long-term dependencies and Gaussian Processes for uncertainty quantification. Multi-head attention was used to capture dependencies. Gaussian Processes were implemented for probabilistic predictions with a kernel combining RBF and constant kernels [22]. The Transformer + Gaussian Processes (GP) model combines deep learning with probabilistic modeling to enhance prediction and

uncertainty estimation. The Transformer module is composed of a custom encoder block featuring two multi-head attention layers (with 2 attention heads), feed-forward layers with 32 units, and a dropout rate of 0.1 to reduce overfitting. After processing the time-series input, the Transformer's output is passed through a fully connected dense layer with 50 units and an output layer with 1 unit. The model is trained for 50 epochs with the Adam optimizer and a batch size of 32.

Once trained, the predicted outputs from the Transformer model are used as input to a Gaussian Process (GP) regression model, which is configured with a radial basis function (RBF) kernel scaled by a constant kernel. The GP model is optimized with 10 restarts to avoid local minima. The GP outputs both the predicted values and standard deviation estimates, enabling the construction of 95% confidence intervals (±1.96σ), which are visualized in the result figures to represent prediction uncertainty.

Implementation Details and Reproducibility

All experiments were conducted using Python programming language. The main software libraries and their versions used in this study are as follows: TensorFlow 2.12.0, scikit-learn 1.3.0, pandas 1.5.3, numpy 1.23.5, matplotlib 3.7.1, and stats models 0.13.5. To ensure the reproducibility of the models, all key hyperparameters were reported. The batch size was set to 32 and all models were trained for 50 epochs. The learning rate for the Transformer model was set to 0.001 using the Adam optimizer. The dropout rate was fixed at 0.2 across deep learning models to reduce overfitting. The Transformer encoder used 2 attention heads and a feed-forward layer with 32 units. In the CNN+LSTM model, two convolutional layers with 32 and 64 filters and a kernel size of 2 were used, followed by two LSTM layers each with 50 units. For the Gaussian Process regressor, an RBF kernel multiplied by a constant kernel was employed with 10 restarts and alpha set to 1e-2. These implementation details ensure the reproducibility and transparency of the proposed approach.

Evaluation metrics

RMSE (Root Mean Square Error) and R^2 (Determination Coefficient) metrics were used to evaluate the performance of the models. The $RMSE$ is the square root of the mean square of the differences between the model estimates and actual values. The following is expressed in Equation (2). The low values indicate that the model's accuracy is high [23].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2} \qquad (2)$$

R^2 represents the ratio of variance in the dependent variable, as explained by the model. It takes values between 0 and 1. A value close to 1 indicates that the model explains the data perfectly, and a value close to 0 indicates that the model loses its explanatory power. The formulation is given in Equation (3) [24].

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \qquad (3)$$

These two metrics are complementary to each other. The $RMSE$ indicates the prediction errors, while R^2 shows the explanatory power of the model.

Results

From the comparison of the models presented in Table 2, the strengths and limitations of the models are established based on RMSE and values. For instance, the Random Forest (RF) model has an RMSE of 0.072 and a R^2 of 0.30, which is known to be efficient and fast but has a poor ability to capture temporal characteristics of time series data. This limitation makes it less suitable for the more challenging temporal modeling problems. The ARIMA model, however, is better than RF with an RMSE of 0.065 and an R^2 of 0.42. It can deal with linearity and short-time series trends. However, it cannot simulate complex or nonlinear temporal dependencies like in dynamic systems, such as earthquake magnitude forecasting. The LSTM model has a better temporal modeling capability R^2 of 0.51, meaning it can capture sequential dependencies. However, its RMSE of 0.097 indicates room for improvement, particularly in handling complex spatial-temporal relationships. The hybrid CNN+LSTM model combines the best convolutional neural networks for extracting features from spatial data and recurrent neural networks for data sequences dependent on time. This approach leads to an RMSE of 0.090 and R^2 of 0.58, which proves that the model is efficient in learning the spatial-temporal evolution and performs better than the baseline models such as RF and ARIMA. The Transformer+ Gaussian Processes (GP) model is the best among the models compared with RMSE of 0.063 and an R^2 of 0.62. This hybrid approach combines Transformers' long-term dependency modeling capabilities with the probabilistic insights of Gaussian Processes, providing robust predictions and uncertainty estimation. This makes it the most reliable model for earthquake magnitude predictions, especially in applications requiring accuracy and confidence quantification. In conclusion, while each model has its strengths, hybrid approaches like CNN+LSTM and Transformer + GP emerge superiorly due to their ability to integrate spatial, temporal, and probabilistic aspects into the prediction framework (Table 2).

Table 2. Model comparisons.

Model	$RMSE$	R^2	Key Notes
Random Forest (RF)	0.072	0.30	Simple, fast, lacks temporal insight.
ARIMA	0.065	0.42	Linear dependencies only.
LSTM	0.097	0.51	Strong temporal modeling.
CNN+LSTM	0.090	0.58	Effective spatial-temporal mix.
Transformer +GP	0.063	0.62	Robust uncertainty estimation.

The Random Forest model struggles to capture the temporal trends and provides static future predictions. LSTM shows an improved ability to follow the general trends of the data. It predicts slightly better future values compared to Random Forest. Captures sequential dependencies but may still struggle with complex temporal shifts. ARIMA predicts declining trends for future earthquake magnitudes. It performs better for linear and short-term patterns. This hybrid model captures spatial and temporal dependencies, making more dynamic and accurate predictions. It shows better generalization and flexibility compared to standalone LSTM or Random Forest models. The transformer + Gaussian hybrid model offers the most accurate predictions and incorporates a 95% confidence interval. Predictions are robust, with uncertainty quantified effectively. Combines long-term dependency modeling of Transformers with probabilistic insights from Gaussian Processes, making it the most reliable approach. Transformers + Gaussian Processes excels in accuracy and reliability. Hybrid models consistently outperform standalone methods by leveraging complementary strengths. Hybrid models like CNN+LSTM and Transformer + Gaussian can significantly enhance earthquake prediction systems. In Figure 3, the Random Forest model demonstrates a general ability to capture the trend of earthquake magnitudes. However, it underestimates certain peak values and lacks the ability to model temporal dependencies, which limits its effectiveness in sequential forecasting. In Figure 4, the LSTM model successfully captures temporal dependencies in the historical data. The future predictions appear smoother, indicating the model's tendency toward conservative estimation, though overall trends are reasonably followed. In Figure 5, the ARIMA model shows reasonable performance in modeling linear components of the time series. However, the predicted future values are relatively flat and fail to reflect nonlinear or abrupt changes, which reduces forecasting accuracy in dynamic settings. In Figure 6, the CNN+LSTM hybrid model captures both spatial and temporal features more effectively. The predicted future magnitudes exhibit better alignment with recent patterns, though small deviations remain around highly variable points. In Figure 7, the Transformer + Gaussian Processes model offers both accurate predictions and uncertainty quantification. The future estimates fall within narrow confidence intervals, highlighting the model's robustness and the reliability of its predictive uncertainty.

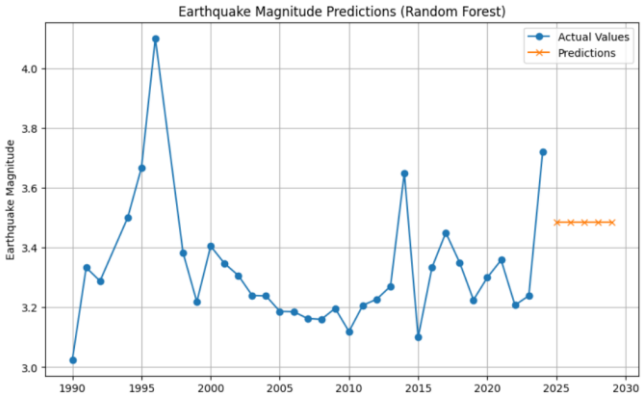


Figure 3. Earthquake magnitude estimates with Random Forest.

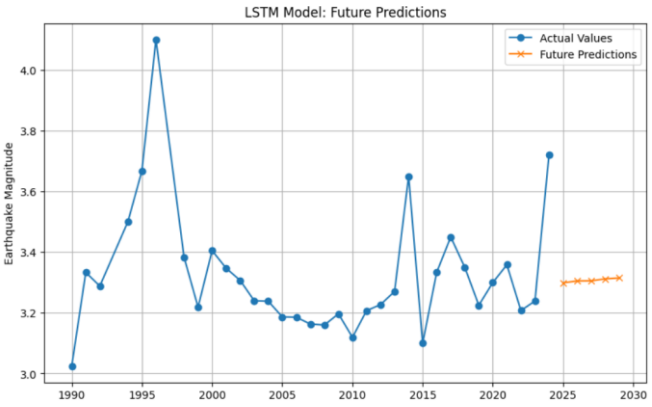


Figure 4. Earthquake magnitude estimates with LSTM.

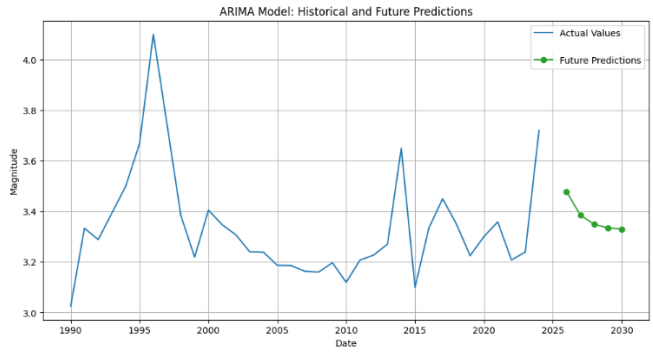


Figure 5. Earthquake magnitude estimates with ARIMA.

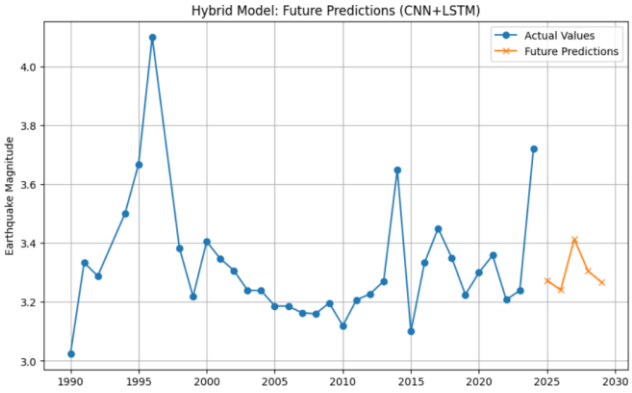


Figure 6. Earthquake magnitude estimates with CNN+LSTM.

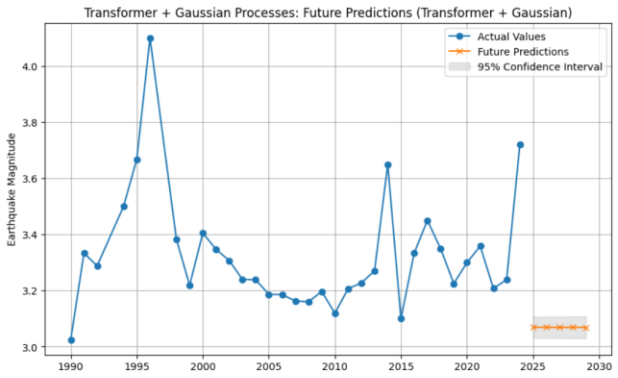


Figure 7. Earthquake magnitude estimates with Transformer + Gaussian.

Discussion

The performance results of the evaluated models provide important information on earthquake magnitude estimation. Traditional models such as Random Forest ($RMSE$: 0.072, R^2: 0.30) and ARIMA ($RMSE$: 0.065, R^2: 0.42) have fundamental limitations in capturing the complex temporal dynamics inherent in seismic data. Although LSTM showed improved temporal modeling (R^2: 0.51), its relatively high $RMSE$ (0.097) points to difficulties in handling the complex spatiotemporal relationships of earthquake events. In particular, the superior performance of hybrid models such as CNN+LSTM ($RMSE$: 0.090, R^2: 0.58) and Transformer + GP ($RMSE$: 0.063, R^2: 0.62) emphasizes the importance of architectures that can simultaneously handle both spatial features and temporal dependencies while providing uncertainty quantification.

These findings highlight a clear trend toward hybrid approaches that integrate the complementary strengths of different modeling paradigms. Recent studies also emphasize the increasing use of deep learning approaches in seismic forecasting, particularly in the Turkish context. For instance, Kas (2023) [25] applied LSTM, GRU, and BiLSTM models to forecast earthquake timing using seismic data from Turkey spanning 1900–2018, highlighting the comparative strengths of different neural architectures. Li et al. (2024) [26] focused on real-time monitoring by utilizing CNN-based models for detecting seismic phases and estimating magnitudes in the 2023 Kahramanmaraş aftershock sequence. Shah et al. (2024) [27] employed Random Forest models for damage prediction based on multiple features such as magnitude, building stability, and population density in Turkish earthquakes. These recent studies support the continued relevance and expansion of AI-based models in earthquake prediction and risk assessment, and are consistent with the hybrid modeling direction taken in this study.

The ability of the Transformer + GP model to combine long-range dependency modeling with probabilistic uncertainty estimation represents a significant advance for practical earthquake prediction applications. This is particularly valuable for early warning systems in which the confidence interval is as important as the point estimate. The performance gap between traditional statistical methods and hybrid deep learning architectures underscores the need for models specifically designed to handle the nonlinear, spatiotemporal properties of seismic data. In addition to prediction accuracy, computational efficiency is a crucial factor, especially in real-time earthquake monitoring and early warning systems. Classical models such as Random Forest and ARIMA are relatively lightweight and can be deployed in time-sensitive environments. Deep learning models like LSTM and CNN+LSTM offer improved accuracy but come with higher computational costs due to their sequential and multi-layered nature. The Transformer + GP model, while the most accurate and informative, requires significant computational resources during both training and inference. Therefore, the choice of model should balance prediction quality with time and resource constraints depending on the specific application.

Conclusion

This study demonstrates how hybrid models, particularly the hybrid deep learning models, can be used to predict earthquake magnitude. The Transformer + GP model was the most efficient, and the best performance was achieved by combining deep learning methods with probabilistic modeling. Some models, such as Transformer + GP, are well suited for seismic early warning systems, mainly due to their predictive capabilities and confidence intervals. The integration of uncertainty quantification offers better decision-making capabilities. The results indicate that hybrid models outperform standard-alone machine learning methods. The CNN+LSTM model efficiently extracted spatial and temporal features, while the Transformer + GP model excelled in quantifying uncertainty, which is crucial for earthquake prediction. Hybrid models can be used in early warning systems to estimate the likelihood and magnitude of future earthquakes. Gaussian Processes add value by offering confidence intervals for decision-making under uncertainty. The data set's size and quality can affect the model's performance. ARIMA as a model is simple and, therefore, cannot handle some complex models. In future studies, comparing model performance across regional and global seismic datasets could help assess the

generalizability and robustness of the proposed approaches under different geological conditions.

Future work will require more data and other attributes, such as geographical location, to improve forecast accuracy.

References

[1] Z. Y. İlerisoy, F. Gökşen, and A. Soyluk, "Deprem Kaynaklı İkincil Afetler ve Türkiye Örneklemi / Secondary Disasters Caused by Earthquakes and Turkey Sample," 2022. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/357635207

[2] A. C. Yoloğlu and F. Zorlu, "Regional Agglomeration and Disparities in Relation to Earthquake Risks in Türkiye," Journal of City and Regional Planning, vol. 06, no. 01, pp. 78–96, 2024.

[3] E. Demirelli, H. İ. Solak, and İ. Tirkyakioğlu, "Makine öğrenmesi algoritmaları ile deprem katalogları kullanılarak deprem tahmini," Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Sep. 2023, doi: 10.17714/gumusfenbil.1268504.

[4] N. Yelboğa, "Kahramanmaraş Depremi Özelinde Travmatik Yas Ve Sosyal Hizmetin Yas Danişmanliği Müdahalesi," Tobider - International Journal of Social Sciences, vol. 7, no. 1, Mar. 2023, doi: 10.30830/tobider.sayi.13.6.

[5] T. Bhandarkar, V. K, N. Satish, S. Sridhar, R. Sivakumar, and S. Ghosh, "Earthquake trend prediction using long short-term memory RNN," International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), vol. 9, no. 2, p. 1304, Apr. 2019, doi: 10.11591/ijece.v9i2.pp1304-1312.

[6] A. Doğan and E. Demir, "Earthquake Prediction in Turkey with Structural Recurrent Neural Networks," in 2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), IEEE, Oct. 2020, pp. 1–4. doi: 10.1109/SIU49456.2020.9302400.

[7] R. Li, X. Lu, S. Li, H. Yang, J. Qiu, and L. Zhang, "DLEP: A Deep Learning Model for Earthquake Prediction," in 2020 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), IEEE, Jul. 2020, pp. 1–8. doi: 10.1109/IJCNN48605.2020.9207621.

[8] A. Berhich, F.-Z. Belouadha, and M. I. Kabbaj, "LSTM-based Models for Earthquake Prediction," in Proceedings of the 3rd International Conference on Networking, Information Systems & Security, New York, NY, USA: ACM, Mar. 2020, pp. 1–7. doi: 10.1145/3386723.3387865.

[9] M. Karcı and İ. Şahin, "Derin Öğrenme Yöntemleri Kullanılarak Deprem Tahmini Gerçekleştirilmesi," ARTIFICIAL INTELLIGENCE STUDIES, vol. 5, no. 1, pp. 23–34, 2022, doi: 10.30855/AIS.2022.05.01.03.

[10] B. Bhargava and S. Pasari, "Earthquake Prediction Using Deep Neural Networks," in 2022 8th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS), IEEE, Mar. 2022, pp. 476–479. doi: 10.1109/ICACCS54159.2022.9785011.

[11] A. Doğan, "Earthquake prediction for the northwest of Turkey with machine learning methods," Yerbilimleri/ Earth Sciences, vol. 44, no. 2, pp. 166–178, Aug. 2023, doi: 10.17824/yerbilimleri.1325321.

[12] P. Kavianpour, M. Kavianpour, E. Jahani, and A. Ramezani, "A CNN-BiLSTM model with attention mechanism for earthquake prediction," J Supercomput, vol. 79, no. 17, pp. 19194–19226, Nov. 2023, doi: 10.1007/s11227-023-05369-y.

[13] N. S. M. Ridzwan and S. H. Md. Yusoff, "Machine learning for earthquake prediction: a review (2017–2021)," Earth Sci Inform, vol. 16, no. 2, pp. 1133–1149, Jun. 2023, doi: 10.1007/s12145-023-00991-z.

[14] S. Gücek and İ. Zorluer, "Bir Boyutlu Analiz Yöntemiyle Sahaya Özel Sıvılaşma Risk Haritalarının Oluşturulması: Afyonkarahisar Örneği," Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering, vol. 21, no. 4, pp. 908–921, Aug. 2021, doi: 10.35414/akufemubid.930999.

[15] S. Baruah et al., "Moment Magnitude (M W) and Local Magnitude (M L) Relationship for Earthquakes in Northeast India," Pure Appl Geophys, vol. 169, no. 11, pp. 1977–1988, Nov. 2012, doi: 10.1007/s00024-012-0465-9.

[16] T. C. Hanks and H. Kanamori, "A moment magnitude scale," J Geophys Res Solid Earth, vol. 84, no. B5, pp. 2348–2350, May 1979, doi: 10.1029/JB084iB05p02348.

[17] E. M. Scordilis, "Empirical Global Relations Converting M S and m b to Moment Magnitude," J Seismol, vol. 10, no. 2, pp. 225–236, Apr. 2006, doi: 10.1007/s10950-006-9012-4.

[18] J.Brownlee, "Long Short-term Memory Networks with Pyt," 2017.

[19] G. Tunnicliffe Wilson, "Time Series Analysis: Forecasting and Control,5th Edition, by George E. P. Box, Gwilym M. Jenkins, Gregory C. Reinsel and Greta M. Ljung, 2015. Published by John Wiley and Sons Inc., Hoboken, New Jersey, pp. 712. ISBN: 978-1-118-67502-1," J Time Ser Anal, vol. 37, p. n/a-n/a, Mar. 2016, doi: 10.1111/jtsa.12194.

[20] S. Hochreiter and J. Schmidhuber, "Long Short-Term Memory," Neural Comput, vol. 9, no. 8, pp. 1735–1780, Nov. 1997, doi: 10.1162/neco.1997.9.8.1735.

[21] A. Halbouni, T. S. Gunawan, M. H. Habaebi, M. Halbouni, M. Kartiwi, and R. Ahmad, 'CNN-LSTM: Hybrid Deep Neural Network for Network Intrusion Detection System', IEEE Access, vol. 10, pp. 99837–99849, 2022.

[22] C. E. Rasmussen and C. K. I. Williams, Gaussian Processes for Machine Learning. The MIT Press, 2005. doi: 10.7551/mitpress/3206.001.0001.

[23] T. Chai and R. R. Draxler, "Root means square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?," Feb. 28, 2014. doi: 10.5194/gmdd-7-1525-2014.

[24] L. Bouzid, M. A. Yallese, S. Belhadi, and A. Haddad, "Modelling and optimization of machining parameters during hardened steel AISID3 turning using RSM, ANN and DFA techniques: Comparative study," Journal of Mechanical Engineering and Sciences, vol. 14, no. 2, pp. 6835–6847, Jun. 2020, doi: 10.15282/JMES.14.2.2020.23.0535.

[25] Ö. Kas, "Turkey Earthquake Prediction with Deep Learning Algorithms," MSc Thesis, National College of Ireland, 2023. [Online]. Available: https://norma.ncirl.ie/7197/1/omerkas.pdf

[26] W. Li, M. Chakraborty, J. Köhler, C. Quinteros-Cartaya, G. Rümpker, and N. Srivastava, "Earthquake monitoring using deep learning with a case study of the Kahramanmaraş Turkey earthquake aftershock sequence," Solid Earth, vol. 15, pp. 197–210, 2024. doi: 10.5194/se-15-197-2024.

[27] S. Shah, A. Lin, S. Lin, and J. Patel, "Turkey's Earthquakes: Damage Prediction and Feature Significance Using a Multivariate Analysis," arXiv preprint, arXiv:2411.08903, 2024. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2411.08903

Dicle University
Journal of Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/dumf
duje.dicle.edu.tr

Research Article

Design and Development of Effective Furrower Mounting Bracket Using Topology Optimization

Hilmi Saygin SUCUOGLU[1*], Ismail BOGREKCI[2], Pinar DEMIRCIOGLU[3], Berkcan AKSOY[4]

[1]Aydin Adnan Menderes University, Mechanical Engineering Department, hilmisucuoglu@adu.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-2136-6015
[2] Aydin Adnan Menderes University, Mechanical Engineering Department, ibogrekciu@adu.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-9494-5405
[3] Aydin Adnan Menderes University, Mechanical Engineering Department, pinar.demircioglu@adu.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-1375-5616
[4] Aydın Adnan Menderes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mechanical Engineering, berkcan637@hotmail.com, Orcid No: 0009-0001-4838-3077

ARTICLE INFO

Article history:

Received 14 November 2024
Received in revised form 25 March 2025
Accepted 17 May 2025
Available online 30 June 2025

Keywords:

Agricultural Machinery, Fatigue Analysis, Finite Element Analysis, Topology Optimization, Light Weight Structure Design, Structural Optimization, Weight Reduction, Topology Optimization Approaches

DOI: 10.24012/dumf.1584851

* Corresponding author

ABSTRACT

Structural and design improvements on the agricultural machinery using the engineering technology and tools are crucial in today world. It is possible to create the cost effective, structurally safe, and easy to manufacture components and parts using engineering tools such as topology optimization and Finite Element Analysis (FEA) methods. In this study it was aimed to create an optimized structure for the agricultural mounting bracket of the furrower. For those purposes, preliminary structure design was created, and FEA was conducted to observe the occurred stresses, deformations and total mass. Then topology optimization was conducted to reduce the excessive weights. The FEA and fatigue analysis were applied to the new optimized structure to check and validate the strength. It was observed from the results that the weight was reduced by 13.5%. The occurred stresses and deformations values were found as almost same 199,0 MPa with the preliminary structure. From all obtained results it was concluded that the mounting bracket was structurally optimized. It had similar structural strength with reduced weight.

Introduction

Furrowers are commonly used attachments in the agricultural machinery sector for soil cultivation. It's used to create channels called furrows in the field by cultivating the soil. The main purpose is to establish irrigation systems in the field or prepare preliminary groundwork for planting. These attachments aim to increase productivity by creating grooves of specific depth and width on the surface of the soil. They allow planting seeds and plants in these grooves or establishing irrigation channels, ensuring proper water distribution to the plants.

The importance of agricultural machinery has significantly increased in today's world. The labor costs and time can be tremendously decreased with the utilization of the machinery. In the conventional manufacturing methods of those machines, the structures might be too heavy causes to the usage of unnecessary material, time and laboring and unexpected energy consumption when they are operated. The lightening process of the agricultural machinery can provide the avoiding of excessive reinforcement, reducing the necessary pulling force, and thus decreasing the energy consumption by the tractor for the operation of soil cultivation [1]. There are studies on the lightening of agricultural machinery. These studies strongly emphasize that the determination of the effective loads on the soil cultivation machines have crucial effect on the design optimization [2,3].

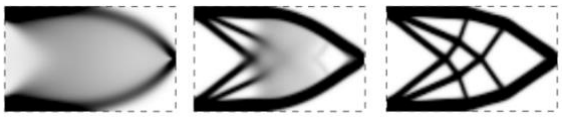
Topology optimization is frequently used in product design processes and utilized in various industries such as automotive and aerospace. Its applications have been expanded with the development of the additive manufacturing technologies. The aim of topology optimization is to optimize material distribution within a designated design space considering the specific loads, boundary conditions, and constraints. The goal is to reduce the weight of the design while enhancing its strength and natural frequencies. The objective of optimization is to determine the appropriate material usage within the specified design area to achieve the desired structural performance while meeting strength criteria. In the process, designed volume is divided into smaller elements, FEA model is created, and boundary

conditions are applied to perform the FEA; respectively. During the analysis, the elements exhibit intermediate density values. These values approach close to 1 or 0 by employing penalization techniques such as the power law to penalize higher-density elements. This process encourages convergence toward solid and void regions to build the final structure. Throughout the optimization process, the optimization algorithm iteratively updates the material density and converges to a solution to achieve the best performance and design volume. It determines the final structure by ensuring a smooth transition between solid and void regions to create optimized and manufacturable parts. Isotropic Material Penalization (SIMP) is commonly preferred method for determining the distribution of elements in topology optimization. The SIMP method prescribes an optimal material distribution within a given design space for specific load cases, boundary conditions, manufacturing constraints and performance requirements. The density distribution of material within a design space, denoted by ρ, is discrete, with each element assigned a binary value. For each element, the assigned relative density can vary between the minimum value, denoted as ρ_{min}, and 1, thereby enabling the allocation of intermediate densities for elements that are characterized as porous elements. Given the continuous nature of the relative density of the material, the material Young's modulus in each element is also subject to continuous variation. For each element e, the relationship between the material relative density factor ρ_e and the Young's modulus of elasticity of the assigned isotropic material model E_0 is calculated by the power law [4-6].

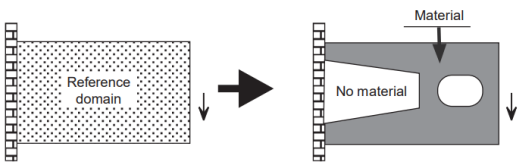
$$E(\rho_e) = \rho_e^{\rho} E_0 \quad (1)$$

Where:

ρ: The density distribution of material
ρ_e: For each element "e" the relation between the material relative density factor
E_0: Young modulus of elasticity of the isotropic material
The SIMP interpolation and generalized schemes are shown in Figure 1.



(a)Interpolation



(b) Generalized scheme

Figure 1. The SIMP interpolation and generalized schemes [7]

There are some commercial and academic topology optimization tools. Most of those tools utilize the SIMP method. A list of commonly used commercial software and academic tools are given in Table 1.

Table 1. Topology optimization tools

Commercial Software	Educational tools
Ansys	SmartDO
Altair OptiStruct	META4ABQ
Solidworks Topology Study	TopOpt
Autodesk Fusion 360	BESO3D
Simulia Tosca	CATOPTO
Abaqus Atom	ProTOp
MSC Nastran	ToPy
Fem Tools Optimization	TRINTAS
OPTISHAPE-TS	ParetoWorks
Vanderplaats Genesis	Topostruct

(Barbieri et al. [8]), carried out a comparative study for the mechanical performance results of topology optimized and generatively designed rocker arm and brake pedal for the Formula Student race car. They obtained from the results that both optimized and generatively designed structures can provide effective results and there is no significant difference. (Meng et al. [9]), provided a detailed exploration of the entire process of a bracket for aviation industry from topology optimization to additive manufacturing. They offered a useful roadmap for researchers in the field of topology optimization. (Cavazzuti et al. [10]), conducted studies involve optimization techniques for automotive chassis design. The objective of the optimization process was the chassis weight reduction, yet in fulfilment of structural performance constraints as required by Ferrari standards. They tried to create the optimum chassis configuration by combining topology, size optimizations, and FEA. They used the structural performance of the Ferrari F458 as reference. Their numerical results showed that they obtained a significant weight reduction and optimized chassis structure.

(Lu et al. [11]) proposed a study of the investigation of the optimization process of the self-propelled sprayer chassis frame. They designed a freestanding longitudinal beam frame with an X-shaped reinforcing beam. The static mechanical properties of the structure under bending, torsion, emergency breaking and emergency turning conditions were analyzed with the finite element analysis methods. The topology optimization method was applied to optimize the cross beam and reinforcing beam locations. Their optimization processes had resulted in a 2.2% reduction in the total mass of the frame, a 19.4% reduction in the maximum deformation while maintaining a small change in the maximum stress under bending condition, and a 4.1% and 15.1% reduction in the maximum deformation and maximum stress of the frame under torsion conditions, respectively.

(Yao et al. [12]) presented a paper for the statical structural analysis of the transporter frame. They have also applied topology optimization processes to enhance the frame design for the parameters of the deformation and uniform stress distribution. The optimization design results demonstrate that the total mass of the frame increased by 8.7%, while the deformation was reduced by 88.2% and the maximum stress decreased by 11.7%.

(Sobocki et al. [13]) studied an industrial application example of the topology optimization for the spray tank bracket. They used the solid isotropic punishing material (SIMP) method under static loads. They obtained lighter and more durable structure with the application of the FEA and topology optimization processes.

In the contemporary era, a plethora of computer-based tools were developed to facilitate the design and analysis cycle of structures. Solid modelling, utilizing CAD methodologies, facilitates the definition of system components and assemblies by designers, with the geometry subsequently employed in applications such as simulation, analysis and prototyping. CAE methods facilitate the execution of virtual prototype simulations, static, kinematic and dynamic analyses. [14-16].

Comprehensive topology optimization process was conducted in this study to lighten the furrower mounting brackets to create structural-cost effective and easy manufacturable structures. The loads on the mounting bracket were determined specified in the American Society of Agricultural and Biological Engineers ASAE 497.5 Standards [17]. Autodesk Fusion 360 software utilizes the SIMP method used for topology optimization process. The structural strengths of the preliminary and final structures were also calculated and compared using FEA.

Material and Method

Draft Forces Calculation

Draft forces calculation is crucial to conducting the successful topology optimization study for the furrower mounting bracket. In the literature; (Godwin et al. [18]), proposed a method to calculate the draft forces of plows. (Askari et al. [19]), conducted a study to determine the draft force values obtained from different machines. (Patuk et al. [20]), performed a topology optimization study for the shank of a subsoil tillage machine used for fertilizing. All those studies obtained draft force results were consistent with ASAE 497.5 standard [17].

$$D = F_i[A + B(S) + C(S)^2]WT \quad (2)$$

Where:

F: A dimensionless soil texture adjustment parameter

i: 1 for fine, 2 for medium and 3 for coarse textured soils

A, B, C: Machine-specific parameters

S: Field speed, km/h

W: Machine width, m

T: Tillage depth, cm for major tools, 1 (dimensionless) for minor tillage tools and seeding implements

D: Implement draft

The parameters and values were used as;

A :273, B:13.3, C: 0, F_i : 0.65

Machine operating conditions.

S: 8 km/h

W:1.8 m

T = 8 cm

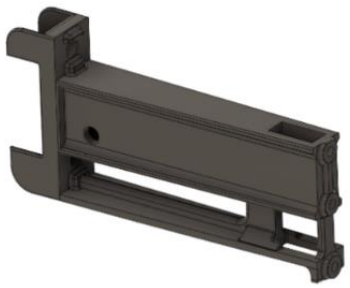
D = $0.65[273 + 13.3(8) + 0]$ (1.8) (8)

according to ASAE 497.5 standard.

To determine the forces acting on the furrower bracket, tensile force applied to the component was found, then using this data, force on the furrower shank was calculated. Draft forces can be affected by the environmental and operation conditions such as machine working depth and tractor speed. For the draft force calculations, all those effects were taken into consideration. The equation from the ASAE 497.5 standard and literature studies were considered [17-20]. The average draft force on the mounting bracket was calculated as 2,828.0 N.

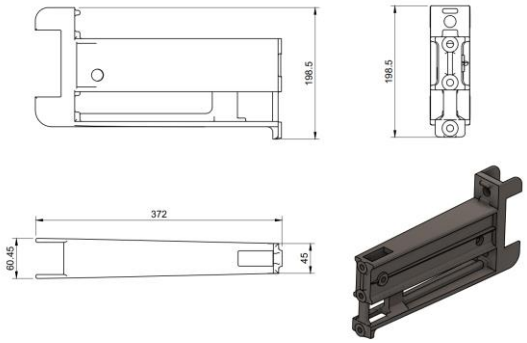
Design of the Mounting Bracket

The designed furrower mounting bracket is actively used to connect the furrower leg to the main frame of the machine. Five pieces of mounting brackets are used in the assembly of one machine. All the 3d cad models and engineering drawings were created using Autodesk Fusion 360 software. 3d cad model, location and engineering drawing of the bracket is shown in Figure 2.



(a) 3d cad model

(b)Location



(c) Engineering drawing

Figure 2. 3d cad model, placement and engineering drawing of furrower mounting bracket

Structural Analysis

Structural analysis was conducted using Ansys Workbench Static Structural tool based on the calculated draft forces. Boundary conditions in the analysis are shown in Figure 3.

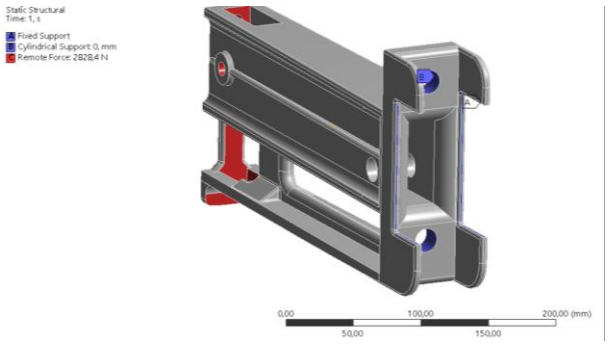


Figure 3. Boundary conditions in structural analysis environment

The draft forces were applied as remote force as 1,750.0 N as vertical and 2,220.0 N as horizontal in the analysis environment (Figure 4).

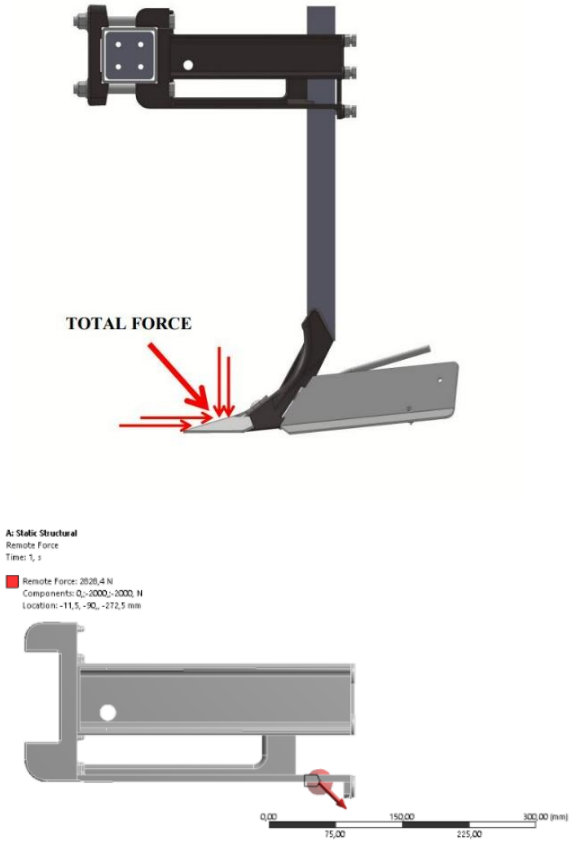


Figure 4. Draft force application in structural analysis environment

The hex dominant mesh method was used, material was assigned as GS-45 cast steel. The mechanical properties of the GS-45 cast steel are given in Table 2.

Table 2. Mechanical properties of material [7]

Properties	GS-45 Cast Steel
Young Module	200.0 MPa
Poisson Ratio	0.3
Tensile Strength	450.0 MPa
Yield Strength	260.0 MPa
Fatigue Strength (10^6For Cycle)	200.0 MPa

Topology Optimization and Design Validation

Topology optimization was performed to remove non-load bearing and unnecessary regions within defined boundaries in a volume. Those topology optimization studies were conducted in Autodesk Fusion 360 software. Different mass ratio values were applied to structure. The geometry remove regions were observed in the design. 65% mass ratio was selected as the optimum safe distance to the critical edges obtained with this ratio. The original weight of the bracket was 7.4 kg. This weight was reduced to 6.4 kg (13.5%). Weight decrease on the structure was obtained with the

topology optimization process. The stages of topology optimization are shown in Figure 5.

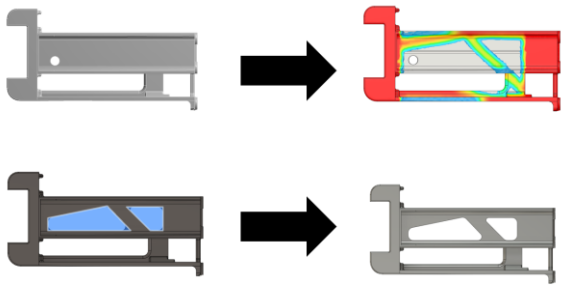


Figure 5. Stages of topology optimization

FEA was applied to the optimized structure by using the same procedure applied to the original preliminary structure. By this way the occurred stresses and deformations on the structure were observed and compared. Fatigue analysis was also applied to check the damage regions and values using Goodman Diagram in Ansys Workbench environment. Stress range values according to the cycle numbers are given in Table 3.

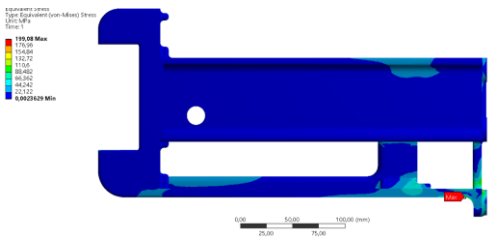
Table 3. Stress range values according to cycle numbers [21]

Cycles	Alternating Stress (MPa)
10	424.9
20	404.2
10	378.3
100	359.9
200	342.3
2,000.0	290.0
10,000.0	258.2
20,000.0	245.6
100,000.0	218.7
200,000.0	208.0
1,000,000.0	185.2

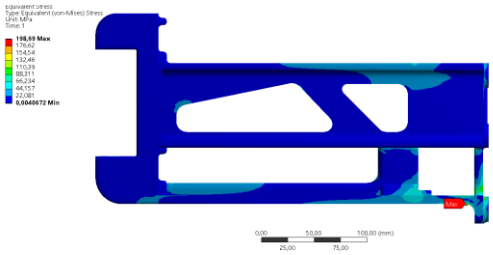
Results And Discussion

Structural Analysis Results

Structural analyses were applied to both preliminary and optimized brackets using the same procedures and boundary conditions to compare and check the topology optimization results. Equivalent von Misses stresses results of two structures are presented in Figure 6.



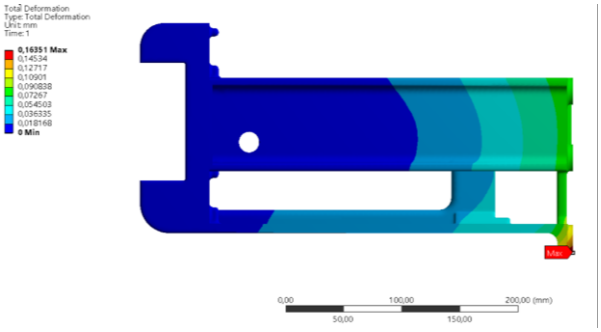
(a) Equivalent von Misses stresses of preliminary structure



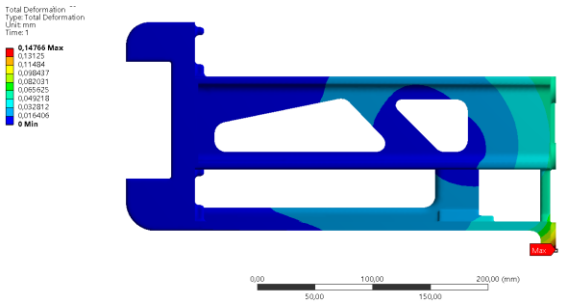
(b) Equivalent von Misses stresses of optimized structure

Figure 6. Equivalent von Misses stresses results

It was obtained from the results that there was not any increase in the maximum stress on the optimized structure. The observed maximum stress values were about 199.0 MPa in both structures.
Deformation results are shown in Figure 7.



(a) Deformations of preliminary structure



(b) Deformations of optimized structure

Figure 7. Deformations result

While deformation was 0.16 mm in the preliminary structure it was observed as 0.14 mm in the optimized. It can be understood from these values that optimization had a slight positive effect on deformation as it provided decrease in weight and increase in stiffness. The results of the fatigue analysis of the optimized structure are shown in Figure 8.

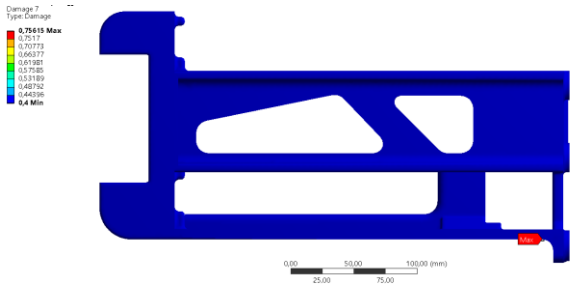


Figure 8. Fatigue analysis results

It was observed from the analyses that the damage in the critical region was attributed to high stress. The highest damage in the critical region was 0.76. As the maximum damage occurring on the bracket was less than one, it can be resulted that the optimized bracket structure could meet the intended number of cycles. All the results obtained from the analyses of the preliminary and optimized structures are given in Table 4 for comparison.

Table 4. Obtained results for preliminary and optimized structures

Results	Preliminary Structure	Optimized Structure
Stress (MPa)	199,0	199,0
Deformation (mm)	0.16	0.14
Damage	0.73	0.76
Weight(kg)	7.4	6.4

From all the analysis and validation results, with the optimized structure the weight of the mounting bracket decreased as 1 kg (13.5%) while keeping structurally integrity.

Conclusion

In this study a comprehensive topology optimization process was applied to furrower mounting brackets to decrease the weight while keeping the rigidity, stiffness, and structural integrity. It was aimed at decreasing the manufacturing costs, time, and operational energy consumption. FEA was applied to preliminary and optimized structures to compare the results and validate the topology optimization.

It was aimed at decreasing weight while keeping the stress and deformations at the same levels. (Lu et al. [9]) applied FEA and topology optimization processes self-propelled sprayer chassis frame. They obtained notable enhancements for the parameters of the total mass and deformation reduction under static loads with the values of 2.2% and 19.4%, respectively. (Yao et al. [10]) studied the statical structural analysis of the transporter frame. They obtained reductions in the total mass and stresses occurred as 8.7% and 11.7%, respectively. In our study, we have conducted optimization and FEA processes with the converted dynamic draft forces related to the interaction of the tool and soil. Furthermore, we analyzed the fatigue behavior of the optimized structure. The weight of the one mounting bracket decreased by 1kg (13.5%). As there are five pieces of mounting brackets used for one machine, important weight, material, manufacturing, and operational energy gain were obtained.

Topology optimization is a valuable tool that enables designers to swiftly create structures that are optimal in specific respects. The usage of topology optimization methods has been demonstrated to markedly reduce the duration of the design process, thereby significantly diminishing the engineering costs associated with the development of new components and products. This process has capacity to engineer significantly superior components in a substantially reduced timeframe when compared with that of a team of experienced designers. It is a great numerical tool to create mass reduction and to increase energy efficiency. However, it should be noted that this process has its own limitations, such as neglecting the environmental effects such as temperature changes and corrosion. Therefore, the results obtained should be compared and analyzed with the real application tests.

References

[1] H. Yurdem, A. Degirmencioglu, E. Cakir and E. Gulsoylu, “Measurement of strains induced on a three-bottom moldboard plough under load and comparisons with finite element simulations,” Measurement, 2019, pp.594-602.

[2] S.J. Smyth, P.W. Phillips and D. Castle, “Handbook on agriculture, biotechnology, and development”, Edward Elgar Publishing, 2014.

[3] W.R. Gill and G.E. Berg, “Soil dynamics in tillage and traction. Agricultural Research Service”, US Department of Agriculture, 1967.

[4] M. P. Bendsøe, N. Kikuchi, “Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method”, Computer methods in applied mechanics and engineering, 71(2), 197-224, 1988.

[5] G. I. Rozvany, M. Zhou, T. Birker, “Generalized shape optimization without homogenization”, Structural optimization, 4, 250-252, 1992.

[6] J.H. Zhu, W.H. Zhang and L. Xia, “Topology optimization in aircraft and aerospace structures design”, Archives of computational methods in engineering, 2016 Vol. 23, pp. 595-622.

[7] A. Bendsøe and O. Sigmund, "Material interpolation schemes in topology optimization", Archive of applied mechanics, 1999. Vol. 69, pp. 635-654,

[8] L. Barbieri and, M. Muzzupappa, "Performance-driven engineering design approaches based on generative design and topology optimization tools: a comparative study", Applied Sciences, 2022.

[9] L. Meng, W. Zhang, D. Quan, G. Shi, L. Tang, Y. Hou, P. Breitkopf, J. Zhu and T. Gao, "From topology optimization design to additive manufacturing: Today's success and tomorrow's roadmap", Archives of Computational Methods in Engineering, 2020.

[10] M. Cavazzuti, A. Baldini, E. Bertocchi, D. Costi, E. Torricelli and P. Moruzzi, "High performance automotive chassis design: a topology optimization-based approach. Structural and Multidisciplinary Optimization", 2020, pp. 45-56.

[11] L. Lu, B. Liu, E. Mao, Z. Song, J. Chen, Y. Chen, "Design and optimization of high ground clearance self-propelled sprayer chassis frame", Agriculture, 13(2), 233, 2023.

[12] M. A. Yao, S. U. Wei, L. A. I. Qinghui, Y. U. Qingxu, W. A. N. Yuan, "Finite element analysis and topology optimization design of lightweight Panax Notoginseng transplanting machine frame," Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 5(2), 51-60, 2024.

[13] S. Sobockı, S. Legutko, J. Wojcıechowskı, S. Szymczyk, "Topology Optimization as a Design Tool-An Industrial Example Of Spray Tank Bracket, Acta Technica Napocensis-Series: Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering, 65(4s), 2023.

[14] H.S. Sucuoglu, I. Bogrekci, P. Demircioglu and O. Turhanlar, "Design & FEA and Multi Body System Analysis of Human Rescue Robot Arm", Advanced Mechatronics Solutions Springer International Publishing, 2016, pp. 651-656.

[15] N. Demir, H.S. Sucuoglu, I. Bogrekci and P. Demircioglu, "Topology optimization of mobile transportation robot", International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, 210-9, 2021.

[16] N. Demir, H.S. Sucuoglu, I. Bogrekci and P. Demircioglu, "Structural & dynamic analyses and simulation of mobile transportation robot", International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, 2021, 5(3): pp.587-595,

[17] "Agricultural machinery management data", American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2011.

[18] R.J. Godwin, M.J. O'dogherty, C Saunders and A.T. Balafoutis, "A force prediction model for mouldboard ploughs incorporating the effects of soil characteristic properties, plough geometric factors and ploughing speed", Biosystems engineering, 2007, pp. 97-117.

[19] M. Askari and S. Khalifahamzehghasem, "Draft force inputs for primary and secondary tillage implements in a clay loam soil", World Applied Sciences Journal,2013. Vol.12, pp. 1789-1794.

[20] I. Patuk, P.F. Borowski, "Computer aided engineering design in the development of agricultural implements: a case study for a DPFA", In Journal of Physics: Conference Series 2020, Vol. 1679.

[21] T. Saraçyakupoğlu, "Usage of additive manufacturing and topology optimization process for weight reduction studies in the aviation industry", Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal, 2021.

Dicle University
Journal of Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/dumf
duje.dicle.edu.tr

Research Article

Experimental Investıgation Of Flow Dynamics Effects Of Cooling With A Circular Impınging Jet

Nevin ÇELİK[1*], Celal KISTAK[2], Haydar EREN[3]

[1] Firat University, Mechanical Engineering Department, nevincelik@firat.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-2456-5316
[2] Firat University, Mechanical Engineering Department, ckistak@firat.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-4621-5405
[3] Firat University, Mechanical Engineering Department, haydar@firat.edu.tr, Orcid No: 0009-0008-5097-5080

ARTICLE INFO

Article history:

Received 7 January 2025
Received in revised form 22 March 2025
Accepted 25 March 2025
Available online 30 June 2025

Keywords:

Impinging jets, Heat Transfer, Turbulent intensity

DOI: 10.24012/dumf.1614964

* Corresponding author

ABSTRACT

This study experimentally investigates the effects of a circular impinging jet on heat transfer and flow dynamics. Using an aluminum nozzle with a diameter of d=13.8 mm, experiments were conducted within the Reynolds number range of 5000−25000. The nozzle-to-plate distance (h/d) was varied between h/d=2−10 to evaluate the jet's performance. Local Nusselt numbers (Nu), stagnation point Nusselt number (Nu_0), and average Nusselt numbers (Nu_{avg}) were analyzed in detail. The results demonstrated that both the nozzle-to-plate distance and Reynolds (Re) number significantly influence heat transfer performance. Increased Reynolds numbers and optimal h/d distances led to enhanced heat transfer at the stagnation point. These findings highlight the potential of impinging jets for energy-efficient cooling applications. The optimal nozzle-to-plate distance for maximum heat transfer was found to be h/d = 6, with a 30.5% increase in Nusselt number at Re = 25000. Additionally, turbulence intensity played a crucial role in heat transfer performance, particularly in the wall jet region, where it enhanced mixing and improved thermal efficiency.

Introduction

Impinging jets are widely used methods in engineering and industry to meet high heat transfer and energy efficiency requirements. When the fluid leaves the nozzle and comes into contact with a surface, a thin thermal boundary layer is formed, especially in the region of stagnation. This increases the momentum effect of the fluid and leads to a significant increase in both heat and mass transfer rates. The earlier study by Jambunathan et al. [1] revealed that the Nusselt number at stagnation in the laminar regime is proportional to the square root of the centreline velocity this finding emphasised the strong connection between heat transfer and flow dynamics. Gordon and Akfirat [2] studied the turbulence characteristics of slot jets and analysed the effect of turbulence on heat transfer in detail, while Schlunder and Gnielinski [3] showed that maximum heat transfer is obtained when the nozzle-plate distance h/d is 7.5.

In recent years, studies on geometrical arrangements, pulsation characteristics and flow parameters of impinging jets have provided extensive results to improve system performance. The study of Kıstak et al. [4] revealed that Reynolds number is the most effective parameter on heat transfer and this effect has a contribution rate of 82%. Another study by Taskiran et al. [5] emphasised that double pulsative jets increase the local Nusselt number due to vortex formation and nanoparticle concentration further improves the performance. In the study of Bai and Gong [6], it was reported that the increase in surface velocity as a result of the interaction of moving surfaces and jet flow provides a significant improvement in heat transfer rates. In studies examining the effects of surface geometry and flow parameters, the importance of nanotechnology and pulsative flow combinations has been emphasised. Celik and Eren [7] investigated turbulent flow conditions in coaxial jets and emphasised the critical role of jet geometry in heat transfer performance. Baghel et al. [8] evaluated the contribution of surface velocity and jet momentum to heat transfer in liquid jets impinging on moving surfaces. Rahimi and Soran [9] investigated the effects of slot jets on moving surfaces and showed that surface velocity positively affects flow dynamics and heat transfer properties. In Wang and Elmi's study [10], it was stated that the distance between jets should be optimised in terms of energy transport and that h/d = 6 - 8 is ideal.

In this study, experimental studies using a circular pipe jet geometry (d = 13.8 mm) were taken as a basis and the effect of the impinging jet on heat transfer under turbulent flow conditions was investigated in detail. Such studies provide

important contributions to the development of energy efficient cooling systems and industrial applications.

Material And Methods

Experimental Setup

The experimental setup utilised in this study is depicted schematically in Figure 1. The jet flow was facilitated by a 500-litre capacity compressor, capable of storing compressed air up to a maximum pressure of 12 bar. The compressor was supported by a pressure gauge, an outlet valve, and an air conditioner. The air conditioner ensured that the compressed air was free from contaminants such as moisture, dust and particles, and the air flow was sent to the rotameters at the desired pressure with the help of the pressure regulator on it. During the experiment, the jet outlet flow rate was measured by two different rotameters with a measurement range of 0-20 m^3/h and 10-100 m^3/h in order to provide precise measurement. The jet system was supplied through a flat circular pipe, composed of aluminium and characterised by a smooth and seamless surface. From the rotameter outlet, a 2 m long straight hose was connected to the nozzle. The length of the nozzle was set at 32d to ensure fully developed flow conditions in a circular cross-section pipe flow.

The impingement plate was manufactured from 0.5 mm thick Cr-Ni stainless steel sheet and designed as a 53 cm wide, 59 cm high, 2.5 cm thick vertical channel. The front surface of the impingement plate was operated under constant temperature conditions to be used for the experiments. Constant temperature conditions were achieved by directing saturated water vapour from a steam boiler into the channel from bottom to top. By this method, a constant temperature of 96 °C was measured at the impinegement surface of the duct. The vapour passing through the impingement surface was discharged to the external environment through a chimney located at the top of the duct. In order to minimise heat losses, the side and rear surfaces of the duct were insulated with a suitable insulation material.This experimental setup was designed and optimised to precisely evaluate the effects of jet impingement on flow and heat transfer. Temperature and velocity measurements were recorded with a CAMPBELL CR10X model data acquisition device connected to a personal computer. For velocity measurements, three separate velocity probes with a measurement range of 0.125-50 and 0.05-2.5 m/s were used.

Data Reduction and Uncertainty Analysis

Temperature measurements were made under conditions where the experiment was carried out in the continuous regime. During the jet impingement, temperature measurements were carried out on the back surface of the duct in contact with the vapour, since the thermocouples placed on the impingement surface are likely to disturb the flow dynamics. However, in order to evaluate the accuracy of this method, a series of preliminary experiments were carried out to analyse the effect of conduction heat transfer through the thickness of the plate on the measurement results.

In the preliminary tests, temperature measurements were carried out on the front surface (impingement surface) and the back surface of the duct before the jet was impinged, with the steam boiler in operation. Based on these measurements, the conduction heat transfer through the thickness of the plate was quantitatively calculated. The results revealed that the heat transfer by conduction is only 0.5% of the total heat transfer. This indicates that the effect of conduction heat transfer through the thickness of the plate on the experimental results is negligible.

In the light of these findings, it was accepted that the fact that the experimental temperature measurements were based on measurements made on the back surface of the plate would not affect the accuracy of the results obtained. Therefore, all temperature measurements were conducted on the basis of data obtained from the rear surface. This method was selected in order to enhance the reliability of the measurements and to circumvent any potential distortion of the flow dynamics.

$$h_{condens} = 0.943 \frac{[g\rho_L(\rho_L-\rho_v)kL^3h_{fg}]^{1/4}}{\mu_L(T_{sat}-T_s)L} \quad (1)$$

Here, the expression h_{fg}' in terms of Jakob number developed by Rohsenow is used instead of latent heat of vaporisation (h_{fg}) :

$$h_{fg}' = h_{fg}(1 + 0.68Ja) \quad (2)$$

$$Ja = Cp_L \frac{\Delta T}{h_{fg}} = Cp_L \frac{(T_{sat} - T_s)}{h_{fg}} \quad (3)$$

Jacob (Ja) number is a dimensionless number used in condensation heat transfer. In the terms in Eq. (1)-(3), the sub-index L indicates the properties of water and the sub-index v indicates the properties of vapour . The thermo-physical properties in Eq. (1) are chosen to depend on the bulk temperature (T_b) (but the latent heat of vaporisation hfg and the vapour density are chosen to depend on the saturation temperature (T_{sat}). Thus, the total heat is found: The validity of the Eq. (1) used to calculate the heat transfer in condensation has been examined by scientists.

$$Q_{condens} = h_{condens}A(T_{sat} - T_s) \quad (4)$$

A more detailed boundary layer analysis based on Eq. (1) for film condensation on a vertical plate was carried out by Sparrow and Gregg [11]. This result, later confirmed by Chen [12], shows that the errors arising from the use of Eq. (1) are less than 3% for $Ja \leq 0.1$ and $1 \leq Pr \leq 100$**.** The agreement of the empirical Eq. (1) with the experimental data was also tested in this study, and it was observed that the agreement with the experimental results was about ±4.3% [13]. The amount of heat generated by condensation is the total amount of heat in the system. When the heat lost by natural convection and radiation is subtracted from the total heat, the remaining value is the net heat amount. The amount of heat by natural convection is obtained with the help of the empirical relation [14].

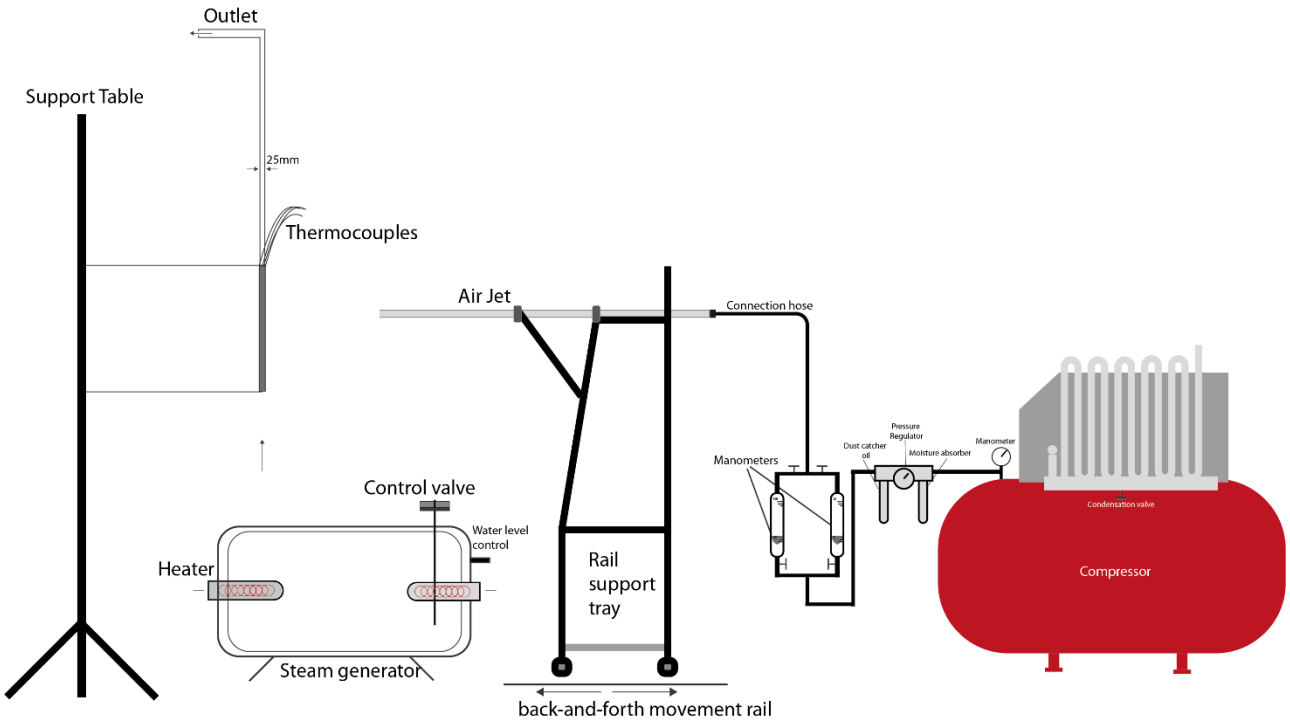


Fig. 1 Schematic representation of the experimental setup

The quantity of heat generated by condensation is equivalent to the total heat content of the system. Upon subtraction of the heat lost through natural convection and radiation from the total heat, the residual value constitutes the net heat amount. The heat transferred through natural convection can be calculated using the empirical relation [14].

$$Nu_{nat} = 0.68 + \left[\frac{0{,}67Ra_l^{1/4}}{[1+(0.492/Pr)^{9/16}]^{4/9}}\right] \quad (5)$$

$$Nu = \frac{h_{nat}L}{k_{air}} \quad (6)$$

$$Q_{nat} = h_{nat}A(T_s - T_\infty) \quad (7)$$

The amount of heat lost by radiation is:

$$Q_{rad} = \varepsilon\sigma A.(T_s^{\,4} - T_\infty^{\,4}) \quad (8)$$

Thus, net heat and then convection heat transfer coefficient is found:

$$Q_{net} = Q_{condens} - (Q_{nat} - Q_{rad}) \quad (9)$$

$$Q_{net} = Q_{conv} = h_{local}A(T_w - T_j) \quad (10)$$

$$h_{local} = \frac{Q_{net}}{A(T_w - T_j)} \quad (11)$$

$$Nu = \frac{h_{local}d}{k} \quad (12)$$

In this study, temperature, velocity and flow rate measurements were made and Nusselt number, Reynolds number and turbulence intensity were calculated with the values obtained from these measurements. The uncertainty of the calculated values was carried out using the method developed by Kline and McClintock [15] with 95% reliability. Accordingly, the highest uncertainty calculated for Nusselt number is ±4.97%, for Reynolds number ±2.89% and for turbulence intensity ±2.84%.

RESULTS AND DISCUSSIONS

In this study, where circular nozzles are used, the convective heat transfer between the hot plate and the jet flow is evaluated by the Nusselt number (*Nu*), which is a dimensionless expression. The dimensionless distance between the nozzle and the plate was set as *h/d* = 4 and the experiments were carried out for values of the Reynolds number between *Re* = 5000 and 25000. The locally calculated the Nusselt number (*Nu*) and the average Nusselt numbers (Nu_{avg}) calculated at the geometrical centre point (Nu_0) of the plate are presented graphically based on the data obtained. In the experiments, measurement and data logging were carried out with a data logger with limited temperature measurement input.

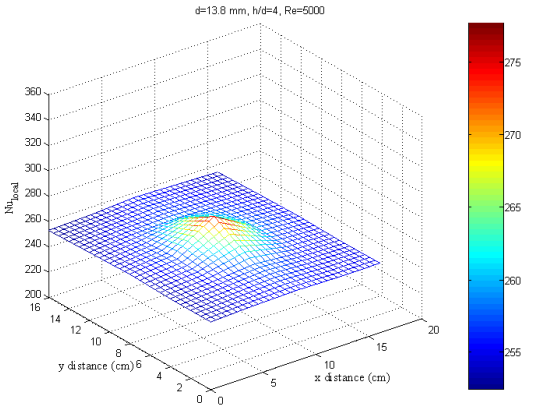


Fig. 2 Local *Nu* number distribution for *d*=13.8 mm, *h/d*=4, *Re*=5000

This limitation precluded the possibility of taking temperature measurements at very close intervals on the plate. However, intermediate values were calculated using computer-aided interpolation methods, thus enabling the local Nusselt distribution to be presented in more detail on the plate surface. The resulting graphs facilitated a more understandable representation of the local Nusselt distribution and made a significant contribution to the visualisation of the experimental results. In Figs. 2-5 local Nusselt distributions are given. The highest *Nu* number on the nozzle occurred at the stagnation point in all experiments. Increasing the *Re* number increased the stagnation point Nusselt number (Nu_0) Increased Reynolds numbers and optimal h/d distances led to enhanced heat transfer at the stagnation point significantly. *However, while increasing the Reynolds number enhances heat transfer, it also introduces certain drawbacks. At higher Reynolds numbers, turbulence intensity increases significantly, leading to flow instability and uneven cooling distribution on the surface. This can result in localized overheating or inefficiencies in heat transfer. Additionally, higher jet velocities require greater energy input, leading to increased power consumption, which may not be ideal for energy-efficient applications. Another critical issue is the potential for surface erosion caused by the high-speed impinging jet, which may degrade material integrity over time. Therefore, selecting an optimal Reynolds number is crucial to balancing heat transfer performance, energy efficiency, and surface durability.* While Nu_0=277.5 at *Re* = 5000, it increased to Nu_0 = 300.2 with an increase of 8.1% compared to *Re* = 5000 when *Re*=10000. Likewise, when the number of *Re* was increased to 15000, Nu_0 = 320.9 with an increase of 15.6% compared to *Re* = 5000, Nu_0 = 343.1 with an increase of 23.5% at *Re* = 20000 and finally Nu_0 = 362.5 with an increase of 30.5% at *Re* = 25000. The distance between the nozzle and the slab undoubtedly has an effect on these high ratios.

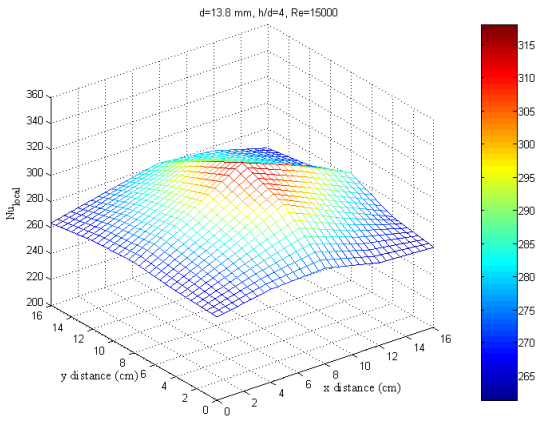


Fig. 3 Local *Nu* number distribution for *d* = 13.8 mm, *h/d* = 4, *Re* = 15000

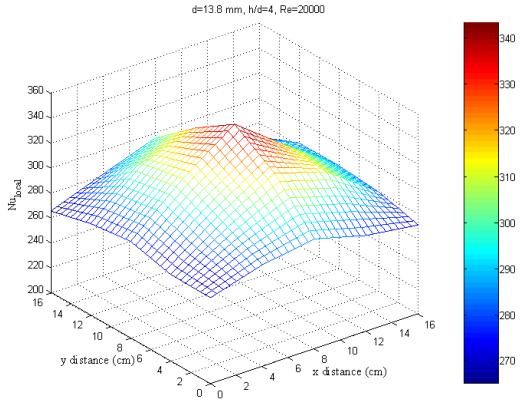


Fig. 4 Local *Nu* number distribution for *d* = 13.8 mm, *h/d* = 4, *Re* = 20000

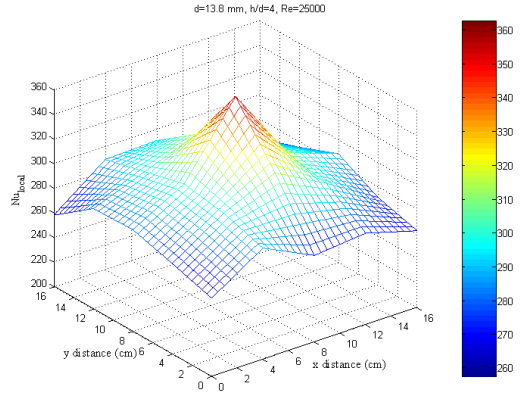


Fig. 5 Local *Nu* number distribution for *d* =13.8 mm, *h/d* = 4, *Re* = 25000

Another striking point in the graphs is that the local Nu numbers increase on the surface from the stagnation point (in radial direction) with increasing *Re* number. When the *Re* number is 5000, a decrease of 8.69% is observed between the Nusselt number calculated at the stagnation point Nusselt number measured at the farthest point from the stagnation point In other words, the local *Nu* numbers are distributed with a difference of 8.69% from the centre point to the farthest point on the plate. Increasing the *Re* number has increased this decrease even more. Namely: 15.11% at *Re*=10000, 17.77% at *Re*=15000, 21.63% at *Re*=20000 and finally 27.32% at *Re*=25000.In Fig. 6 variation of stagnation point with *Re* given.

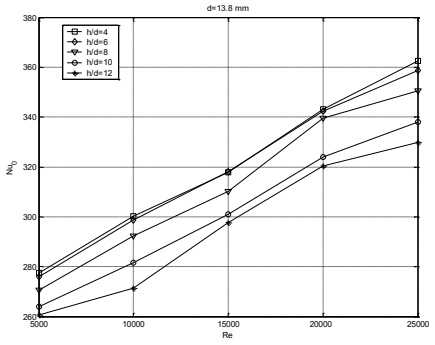


Fig. 6 Variation of stagnation point Nusselt number (Nu_0) with *Re* number for *d* =13.8 mm flat circular nozzle.

The value of the average Nusselt number at the dimensionless distance *h/d* = 4 is also important. The

average Nusselt number (Nu_{avg}) was found to be Nu_{avg}=256.9, 267, 278.6, 301.9 and 305.7 in the range of *Re* number between 5000 and 25000, respectively. As can be seen from the values, the increase in the *Re* number increased the average Nusselt number.

Impingement Zone Flow Character

In this part of the study, mean velocity and turbulence intensity measurements of straight circular jets are presented graphically. The initial aim of the mean velocity and turbulence intensity measurements is to observe the flow dynamics in the flow region in the free jet state in the absence of impingement and then to determine the flow characteristics in the region close to the plate in the event of impingement. In particular, it was aimed to analyse the wall jet region and the impingement (or stall) region by placing the probe close to the plate during the jet impingement. However, the thickness of the probe cable and the thickness of the glass rods carrying the cable prevented the probe tip from fully contacting the plate (the distance between the probe and the plate is approximately 3.2 mm in all experiments). In this case, the wall jet region including the boundary layer thickness could not be analysed. The measurements taken were limited to measurements of the impingement zone close to the slab. Fig. 7 shows the coordinate axes and the measurement mechanism for both cases.

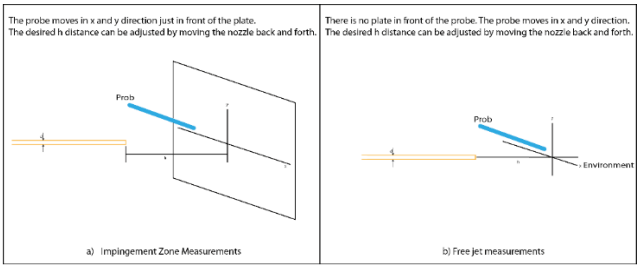


Fig. 7 Coordinate plane used in flow dynamics experiments

The most remarkable feature of free jets is the extremely unsteady nature of the flow. The stability of the jet flow is characterised by the Reynolds number, which is defined as the maximum velocity and flow width of the jet. When the Reynolds number has low values (*Re* ≈ 10-50), periodic velocity variations are observed in the jet. These periodic variations weaken and disappear as the jet moves in the flow direction before turning into irregular turbulence. However, if the Reynolds number exceeds about 50, these periodic variations turn into irregular turbulent flow regime. The frequency of the periodic variation of the jet is found to be proportional to the square of the velocity.

Research has shown that in the absence of impingement, the flow fields of planar jets propagating in a stationary medium can be divided into three main regions. These regions are named as potential core (*PC*) region, characteristic distortion (*CD*) region and asymmetric distortion (*AD*) region [16-18]. The direction of the velocity profiles on the jet axis, depending on their propagation in the cross-section, was determined by analyses on the point axis.

Schlichting [21] and other researchers have suggested that the jet half-width varies proportional to $(h/d)^{2/3}$ and x under laminar and turbulent flow conditions in planar jets, respectively. It was also stated that the centre line velocity varies proportional to $x^{-1/3}$ in laminar flow and $x^{-1/2}$ in turbulent jet flow. Schlichting [21] and other studies [1, 20] stated that the potential core region in circular free jets covers a distance of 12 times the jet outlet half width for turbulent flow, i.e. 6 times the jet diameter.

In the light of this theoretical information, the data obtained from experimental studies were evaluated. In the experiments, a circular jet with a diameter d=13.8mm was used and the Reynolds number range was determined as *Re*=5000-25000. The graphs showing the free propagation of the jet in these ranges are presented in Figs. 8-13. These results are in agreement with the potential core and distortion regions defined in the theoretical literature. The experimental data confirm the behaviour of the flow in the turbulent regime and contribute to the characterisation of the jet propagation properties.

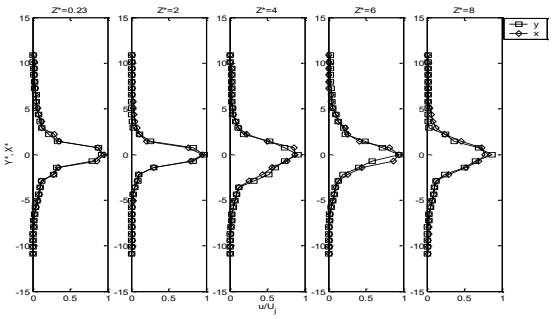


Fig. 8 Variation of average velocity with *Z** for *Re* = 25000 in a circular nozzle with d = 13.8 mm, U_j = 5.5 m/s

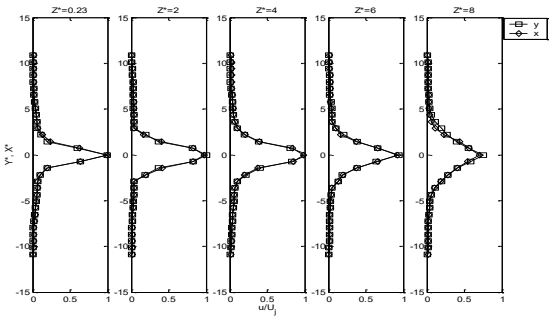


Fig. 9 Variation of average velocity with *Z** for *Re* = 25000 in a circular nozzle with d =13.8 mm, U_j=11.35 m/s

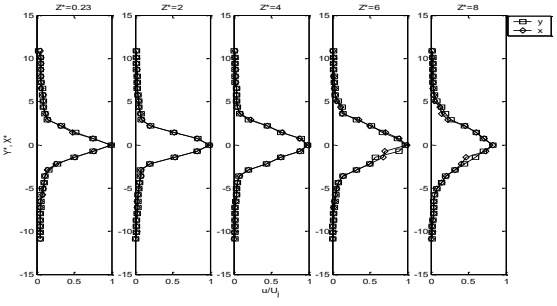


Fig. 10 Variation of average velocity with *Z** for *Re* = 25000 in a flat nozzle with d = 13.8 mm U_j=16.5 m/s

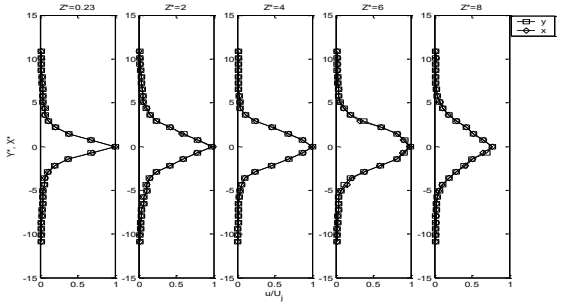


Fig. 11 Variation of average velocity with Z^* for Re = 25000 in a flat nozzle with d = 13.8 mm, U_j=22.5 m/s

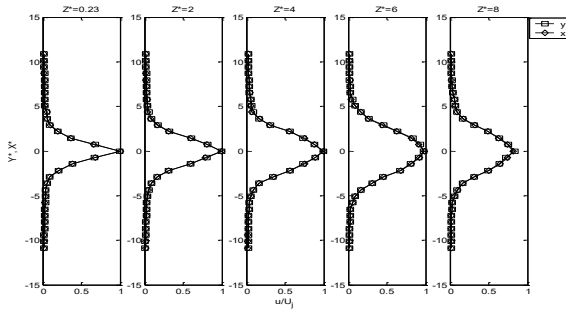


Fig. 12 Variation of average velocity with Z^* for Re = 25000 in a flat nozzle with d = 13.8 mm, U_j=27.5 m/s

It can be seen from the figures that the centre line velocity remains approximately constant until $Z^* = h/d = 6$. When the current is further increased and reaches $Z^* = 8$, the centre line velocity decreases by about %22.19. This shows that there is a rapid deceleration in the circular jet after the potential core region.

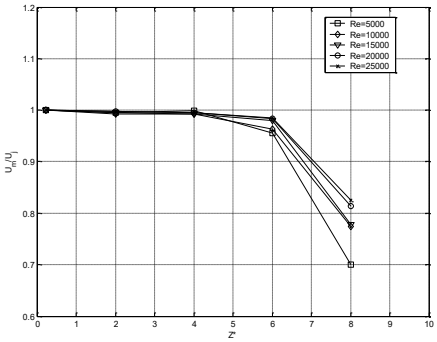


Fig. 13 Ratio of centre line velocity to jet outlet velocity for free jet for d = 13.8 mm

In Fig. 13, the variation of the centre line velocities with respect to each axial distance is also given for each Re number. As can be seen from the figure, the potential core region is very close to $Z^* = 6$.Another important feature of a circular jet stream is the classical bell curve shaped velocity profiles. Although it varies depending on the jet outlet nozzle and aspect ratio, a bell curve profile is seen in most jet streams. The difference between the highest value at the top of the curve and the value measured at the extreme point gives the dimensions of the transverse and longitudinal distribution of the velocity in the medium.

Turbulent Velocity

The turbulence intensity values generated during the propagation of a flat circular nozzle with a diameter of d = 13.8 mm into the stationary medium in the form of a free jet are dimensionless and shown in the graphs between Figs. 14-18. As in the previous section, the graphs are plotted according to the values of Re number in the range of 5000-25000.

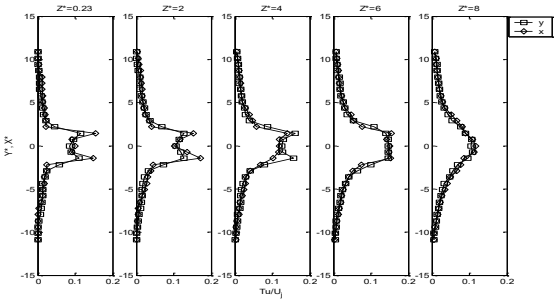


Fig.14 Variation of turbulence intensity with Z^* for Re=5000 in d=13.8 mm flat nozzle U_j=5.5 m/s

A key feature observed in turbulence intensity measurements is the saddle-backed profile, which appears when a jet with maximum centerline velocity exhibits sharp peaks near the center region. As noted in the theoretical section, these peaks may result from either the transition from laminar to turbulent boundary layer flow [19], or the formation of vortices in the shear stress region surrounding the jet [22, 23]. While researchers have highlighted both mechanisms, the primary concern in this study is their impact on heat transfer. The detailed causes and formation mechanisms of these peaks represent a separate area of investigation.

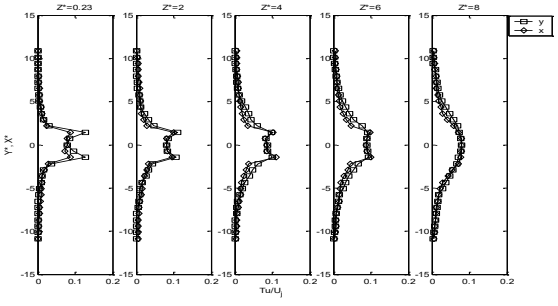


Fig. 15 Variation of turbulence intensity with Z^* for Re=10000 in d=13.8 mm diameter flat nozzle U_j=11.35 m/s

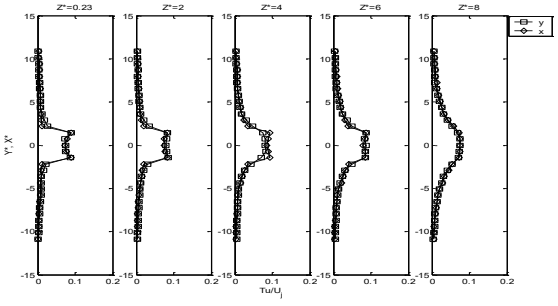


Fig. 16 Variation of turbulence intensity with Z^* for Re=15000 in d=13.8 mm diameter flat nozzle U_j=16.5 m/s

In all graphs between Figs.14-18, it is observed that the turbulence intensity values first increase and then decrease with axial distance. The increasing part is up to Z^*=6 in all experiments. A slight decrease starts at Z^*=8. At *Re* number 5000, this increase is 23.99% from Z^*=0.23 to Z^*=2. There is an increase of 46.00% from Z*=0.23 to Z^*=4, an increase of 69.01% from Z^*=0.23 to Z^*=6 and a decrease of 21.61% from Z^*=0.23 to Z^*=8. As it can be seen, while the turbulence intensity increases at high rates until Z^*=6, the percentage amount starts to decrease from Z^*=8.

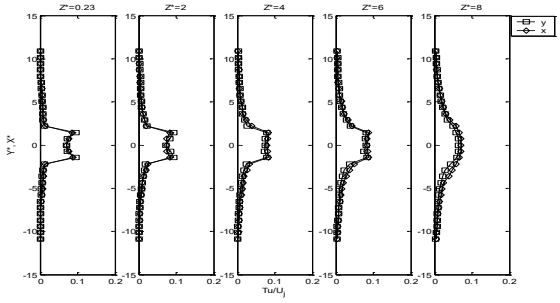


Fig. 17 Variation of turbulence intensity with Z^* for *Re*=20000 in d=13.8 mm diameter flat nozzle U_j=22.5 m/s

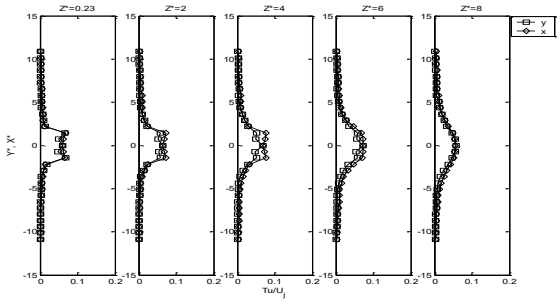


Fig. 18 Variation of turbulence intensity with Z^* for *Re*=25000 in *d*=13.8 mm diameter flat nozzle U_j=27.5 m/s

In the literature, the researchers who made turbulence intensity measurements in the free jet have shown the area where the turbulence velocity starts to decrease by mixing with the still air as a distance of 8-10 times the nozzle diameter. For example, in the experiments of Lee et al [24] with a 13 mm diameter flat circular tubular nozzle at *Re* numbers close to those in this study, it was observed that the turbulence intensity would start to decrease when *h*/*d*=8. In the nozzle with a diameter of *d*=13.8 mm tested in this study, the turbulence intensity values show an increase up to a distance of 6*d* and a tendency to decrease after this distance. Fig. 19 shows the turbulence intensity values measured from the centre line.

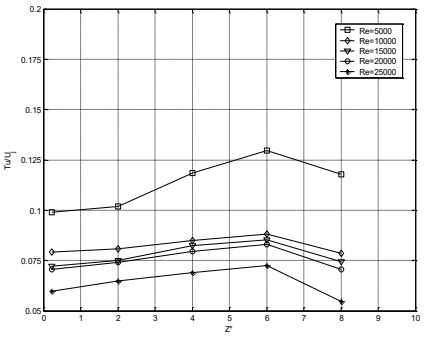


Fig. 19 Ratio of turbulence intensity to jet outlet velocity in case of free jet for *d*=13.8 mm

Distance Measurements Close To The Impingement Plate

Studies on the free-state flow dynamics of jet streams have been increasing with the developing technology so far. However, as mentioned in the introduction, there is a lack of studies on the impingement region. The theoretical analysis of the impingement region is quite difficult and there is not enough information in fluid mechanics in this part. Because, while it is possible to reach a solution for the problem related to the impingement flow in the two-dimensional continuous regime with the Navier-Stokes equations, it cannot be used because it cannot be defined in turbulent flow [1,25].

The hot-wire anemometer used in this study is a device that can take instantaneous measurements at a single point, but cannot be used to analyse the vectorial change of velocity. It is also clear that it cannot be sufficient for the investigation of a highly sensitive region containing boundary layer flow. Based on this fact, it was found more logical to investigate the effect of changing the distance between the nozzle and the plate in the area close to the impingement point rather than determining the details of the velocity and turbulence generated during the impingement. Secondly, the factor that led us to this choice can be explained as follows: When analysing the heat transfer during the impingement of the jet from the nozzle on the plate, it is important to see how the two parameters that seem to be effective on heat transfer, namely the change in the distance between the nozzle and the plate and the number Re, affect the velocity and turbulence. Thus, it was thought that it would be correct to examine how these two parameters, which provide a high rate of cooling during impingement, create a flow effect. Finally, the fact that such an investigation has not been widely reported in the literature is the third main factor in this choice.

The flow dynamics of fully developed circular jets, as described in the literature review, can be divided into four main regions: the free jet, the developing jet, the stall or impingement region and the wall jet. In the impingement region, the flow is influenced by the target surface and slows down and then accelerates, both vertically and horizontally, respectively. Tani and Komatsu [26] showed that this region can extend from the impingement surface to a distance of approximately twice the nozzle diameter (L_{dz}= 2*d*). Girald et al [27] reported that the height of the

distortion zone is 1.2 times the nozzle diameter. The effect of increasing or decreasing the distance between the nozzle and the plate on the impingement zone has not been analysed much in the literature so far.

Velocity and turbulence intensity values close to the plate were measured in both vertical and horizontal directions (*Y**, *X**). Measurements were taken at different nozzle-to-plate distances (*h/d*=4, 6, 8, 10 and 12). In 92 of the 100 experiments with straight circular jets, the deviations of the measured values in the *X** and *Y** axes at the top-bottom and right-left sides of the stagnation point are so small that they can be expressed in thousandhs. The deviations observed in the remaining experiments are due to experimental errors. Although the quasi-symmetry condition was found to be met after the first experiments, the experiments were continued by taking measurements on both axes in order to determine the uncertainty analysis and to derive appropriate correlations. However, the results obtained in these experiments confirmed that measurements can only be taken from one of the *X** or *Y** axes in the flow dynamics tests of co-axial jets, which will be presented in the next section.

Average Speed Values

As the distance from the jet outlet increases, the momentum transfer between the jet and the environment leads to an expansion of the free boundary of the jet and a narrowing of the constant velocity core. Below the core, the velocity profile is not constant over the entire jet cross section and the peak velocity (at the midpoint) decreases with increasing distance from the nozzle outlet. As seen in Figs. 20-25, u/U_j=1 for all *Re* numbers at *h/d*=4 and *h/d*=6. More precisely, when the probe is 3.2 mm away from the plate, the velocity of the air jet impinged on the plate is measured equally until the distance between the nozzle and the plate is 6d. This is the flow region where the surrounding fluid mixes with the jet and thus the jet velocity tends to decrease from the nozzle outlet. As the distance between the nozzle and the plate was increased (*8d, 10d* and *12d*), the velocity measured at the geometric centre of the plate also decreased. The geometrical centre point of the plate also coincides with the stagnation point as will be remembered in the heat transfer experiments. Apart from the distance between the nozzle and the plate, another parameter affecting the jet in the impingement zone is the *Re* number. In all experiments, the *Re* number was chosen in the range of 5000-25000 for comparison.

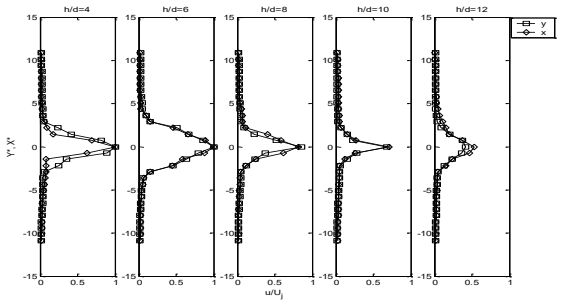


Fig. 20 Variation of average velocity with *h/d* when *d*=13.8 mm, *Re*=5000; *Uj*=5.5 m/s

In Fig.20, the velocity values measured in the impingement zone at various nozzle-plate distances at *Re*=5000 are given in dimensionless form. When *Re*=5000, the average velocity decreased by 85, 67 and 41% at *h/d*=8, 10 and 12, respectively, compared to the jet outlet velocity when the distance between the nozzle-plate is outside the free jet in the vertical (*Y**). Similarly, in the horizontal (*X**), the reduction rates are 81, 71 and 53 percent. The area of influence of the jet is also at short distances at low values of *Re* number.

At *Re* 5000, the velocity measured at the geometrical centre point of the nozzle (*X*=Y*=0*) is equal to the jet outlet velocity until the nozzle-slab distance is six times the diameter. This area is the potential core region (L_{pc}=*6d*) and it is observed that the air velocity measured above the geometrical centre point decreases as one moves out of the potential core. This decrease is 18.08% at *h/d*=8 compared to *h/d*=6, 28.71% at h/d=10 compared to *h/d*=6 and 46.47% at *h/d*=12 compared to *h/d*=6. Figure (20) clearly shows that the velocity decreases significantly in both X* and Y* directions as it moves away from the centre point. These decreases are calculated as 98.9% at *h/d*=4, 98.76% at *h/d*=6, 97.89% at *h/d*=8, 97.64% at *h/d*=10 and finally 96.83% at *h/d*=12. As can be seen, as the nozzle plate distance increased, the reduction rates decreased. In other words, the values at the end are closer to the values at the midpoint. It is the expected characteristic of the jet that the current spreads over a wider area in a wider nozzle-plate range. Due to the small nozzle diameter, the reduction ratios are around 90%, which is quite high.

Fig. 21 shows the dimensionless velocity distribution when the jet outlet velocity is 11.35 m/s for *Re* number 10000. Increasing the Re number directly increases the velocity value at each measurement point. However, when the dimensionless velocity ratios are considered, u/U_j does not show a significant change with the increase of Re number. u/U_j dimensionless number rather shows how the jet is spread. It is seen that the velocity measured at the centre point remains constant until the distance *h/d*=6 at *Re* number 10000. Outside this region of constant velocity field, the velocities decrease as follows: at *h/d*=8, the dimensionless velocity value measured at the centre point decreases by 10.19% compared to *h/d*=6, at *h/d*=10 by %34.5 compared to *h/d*=6, and finally at *h/d*=12 by 49.92% compared to *h/d*=6.

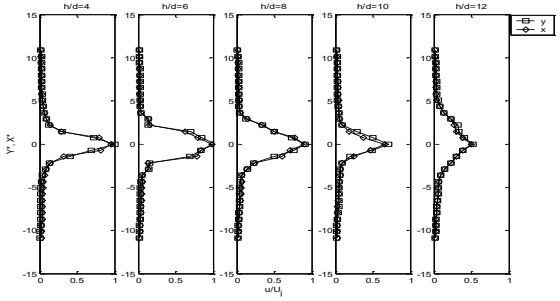


Fig. 21 Variation of average velocity with *h/d* when *d*=13.8 mm, *Re*=10000; *Uj*=11.35 m/s

Starting from the centre point -and it is worth reminding again that this point is the stagnation point on the plate- there is a significant decrease in the velocity value as we

move towards the endpoints of the *X** and *Y** axes. These decreases are 98.84% at *h/d*=4, 98.56% at *h/d*=6, 98% at *h/d*=8, 96.94% at *h/d*=10 and 96.29% at *h/d*=12.

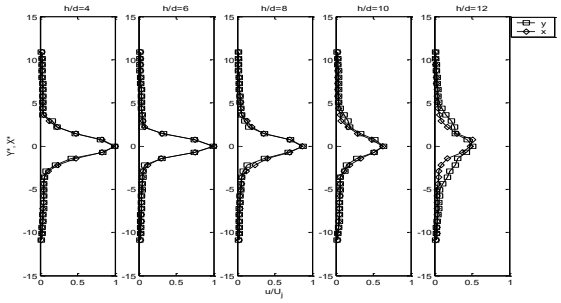


Fig. 22 Variation of average velocity with *h/d* when *d*=13.8 mm, *Re*=15000; *Uj*=16.35 m/s

In Fig. 22, the number of *Re* is increased to 15000. Increasing the *Re* number caused a decrease in the velocity outside the potential core. Namely: 13.202% decrease in dimensionless velocity ratio (u/U_j) at *h/d*=8 compared to *h/d*=6, 37.39% decrease at *h/d*=10 compared to *h/d*=6 and finally 51.68% decrease at *h/d*=12 compared to *h/d*=6. The decreases in the velocity ratio with moving away from the centre point are 98.11% at *h/d*=4, 98.15% at *h/d*=6, 97.36% at *h/d*=8, 96.6% at *h/d*=10 and finally 95.88% at *h/d*=12.

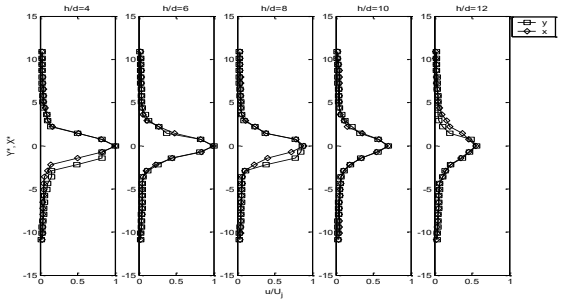


Fig. 23 Variation of average velocity with *h/d* when *d*=13.8 mm, *Re*=20000; *Uj*=22.5 m/s

Fig. 23 shows the velocity distributions in the impingement zone at 20000 values of *Re*. From the graph, it is possible to see how increasing the nozzle-plate distance changes the velocity value penetrating the stagnation point of the plate. However, if it is expressed in numbers; it is seen that the velocity outside the potential core is 11.10% at *h/d*=8, 30.16% at *h/d*=10 and 45.04% at *h/d*=12 compared to the velocity in the potential core region (*h/d*=6). In the range of $0 \le x/d \le 10$, high reductions in velocity were recorded. 97.76% at *h/d*=4, 97.92% at *h/d*=6, 96.34% at *h/d*=8, 96.6% *at h/d*=10 and 95.5% at *h/d*=12.

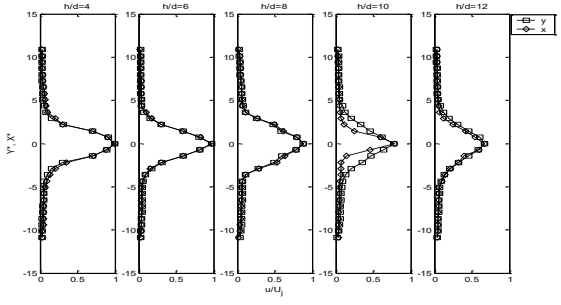


Fig. 24 Variation of average velocity with h/d when *d*=13.8 mm, *Re*=25000; *Uj*=27.5 m/s

At 25000, the maximum tested value of *Re* number, there is a decrease of 11.06% at *h/d*=8, 21.87% at *h/d*=10 and 33.06% at *h/d*=12 compared to *h/d*=6. Compared to the farthest measurement point from the stagnation point, there is a decrease of 97.47% at *h/d*=4, 97.55% at *h/d*=6, 97.71% at *h/d*=8, 96.34% at *h/d*=10 and finally 95.32% at *h/d*=12 (Fig. 24). One of the most important features seen in all *Re* number values given is that the velocity is at high values in a small area especially around the stagnation point and then shows a very rapid decrease. In fact, if we look at the percentage values calculated for all experiments; it is seen that there is a decrease of 95~98% between the stagnation point and the farthest *x/d* distance. The highest speed values are observed between $1.45 \le x/d \le 1.17$. The classical bell curve speed profile flattens at the tip and increases towards the edges as the h/d distance increases. The variation of the velocity values measured in front of the stagnation point according to the nozzle-plate distance is given in Fig. 25 separately according to *X** and *Y** axes.

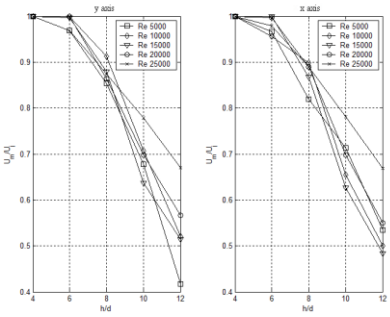


Fig. 25 Ratio of centreline velocity to jet outlet velocity at stagnation point for *d*=13.8 mm

Turbulence Intensity Measured in Front of the Plate

In the nozzle type with *d*=13.8 mm, it is observed that the turbulence intensity values measured in cases where the distance between the nozzle and the plate is short, peak values are observed near the stagnation point. In the absence of an impingement, peak values occur up to a maximum distance of *4d* from the nozzle in the free jet position, but in the presence of an impingement, it can be seen that even the jet impinging at a distance of *6d* in front of the plate makes second maximal. The presence of the plate may cause second and sometimes third peaks above the stagnation point.

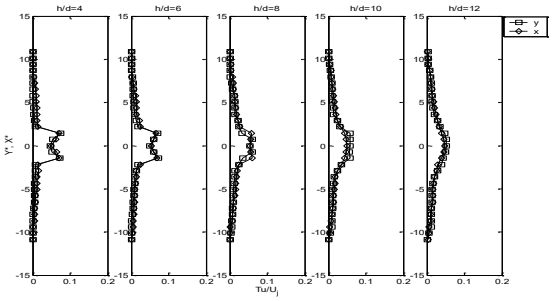


Fig. 26 Variation of turbulence intensity with *h/d* when *d*=13.8 mm, *Re*=5000; *Uj*=5.5 m/s

In Fig. 26, it is observed that increasing the distance of the nozzle hitting the plate increases the turbulence intensity value at the centre point of the plate up to a certain extent and then decreases it. From *h/d*=4 to *h/d*=6, the turbulence value increased by 7.76%. Between *h/d* 4 and 8, there is an increase of 9.77%. From *h/d*=4 to *h/d*=10, a slight increase of =3.64% was recorded. However, from *h/d*=4 to 12, the turbulence intensity measured at the centre tends to decrease by 4.8%. This means that increasing the distance between the nozzle and the plate can increase the turbulence intensity value on the plate up to *h/d*=10. This is in agreement with the statement of Lee et al. [24] in their free jet and impingement turbulence values that 'turbulence will increase up to a distance of 8-10*d* and then decrease'.

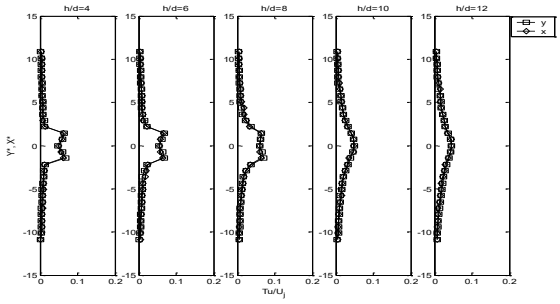


Fig. 27 Variation of turbulence intensity with *h/d* when *d*=13.8 mm, *Re*=10000; *Uj*=11.35 m/s

When the effect of increasing the nozzle-plate distance at *Re* number 10000 on the impingement event is analysed, when an evaluation similar to the above calculation is made, the following result is obtained: Compared to the closest nozzle distance *h/d*=4, the turbulence intensity increased by 10.51% on the plate at h/d=6 distance. Similarly, based on *h/d*=4, an increase of 18.37% at *h/d*=8, 5.61% at *h/d*=10 and a decrease of 9.63% at *h/d*=12 were observed (Fig. 27).

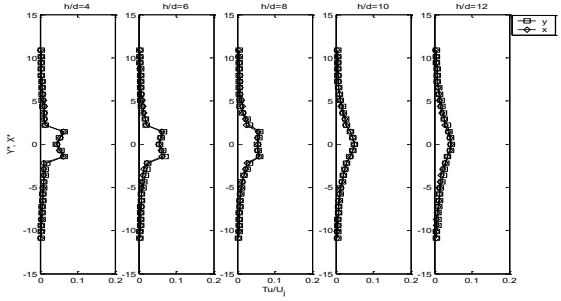


Fig. 28 Variation of turbulence intensity with *h/d* when *d*=13.8 mm, *Re*=15000; *Uj*=16.5 m/s

At the 15000 value of *Re* number shown in Fig. 28, the increase in *h/d*=6 compared to *h/d*=4 reaches a figure of 11.53%. The rate of increase in *h/d*=8 is 16.15%, 8.71% in *h/d*=10. *h/d*=12 shows a decrease of 4.77%.

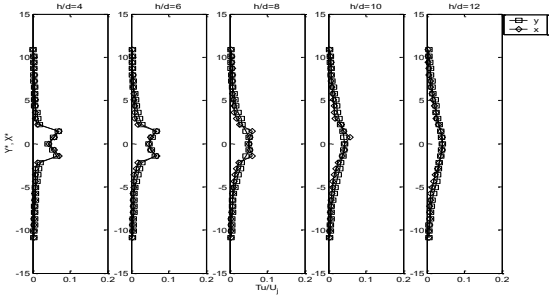


Fig. 29 Variation of turbulence intensity with *h/d* when *d*=13.8 mm, *Re*=20000; *Uj*=22.5 m/s

In Fig. 29, i.e. at *Re*=20000, the rates of increase between *h/d*=6-10 are calculated as 11.46%, 21.48%, 0.44% respectively compared to *h/d*=4. The rate of decrease at *h/d*=12 compared to *h/d*=4 is around 2.97%.

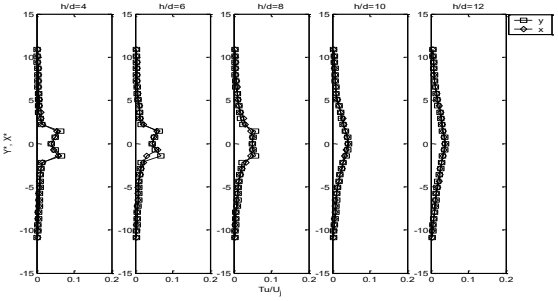


Fig. 29 Variation of turbulence intensity with *h/d* when *d*=13.8 mm, *Re*=25000; *Uj*=27.5 m/s

Finally, when the *Re* number was 25000 (Fig. 29), the effect of increasing the nozzle-sheet distance on the impingement was investigated; increasing *h/d* to 6 caused an increase of 15.16%, increasing *h/d*=8 caused an increase of 27.102%, and increasing *h/d*=10 caused an increase of 8.26% compared to the values at *h/d*=4. Subsequently, it was determined that there was a decrease of 3.78% at *h/d*=12. The % values obtained in the evaluations made so far do not show a complete systematic order. Looking at these values, it is difficult to emphasise whether increasing the number of *Re* is related to increasing the h/d distance. However, it would not be wrong to conclude that increasing the number of *Re* (even if there are deviations in between) has relatively increased the percentage increase rates. One of the general features of the turbulence curves plotted in Figs. 25-29 is that the turbulence measured in front of the impingement plate at distances *h/d*>8 is almost like a free jet turbulence profile. The only difference is that the values are higher here. However, the profiles are very similar. Finally, in figure (30), the variation of the turbulence values measured at the centre with respect to *h/d* and Re number is shown separately on the *X** and *Y** axes.

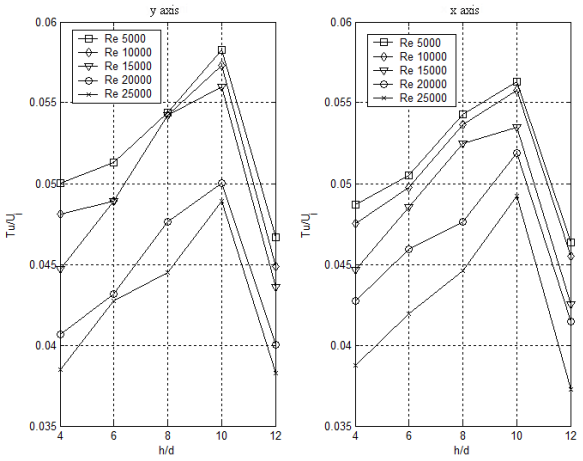


Fig. 30 Ratio of dimensionless turbulence intensity to jet outlet velocity measured at the stagnation point for d=13.8 mm

Conclusions

This study comprehensively analyzed the heat transfer and flow dynamics characteristics of a circular impinging jet under varying Reynolds numbers (5000−25000) and nozzle-to-plate distances (h/d=2−10). Using an aluminum nozzle with a diameter of 13.8mm, the experiments provided valuable insights into the relationship between jet parameters and thermal performance, highlighting the critical influence of Reynolds number and nozzle spacing on local and average Nusselt numbers. The findings emphasize the interplay between jet velocity, turbulence, and thermal boundary layer dynamics in determining heat transfer efficiency. The results revealed that increasing the Reynolds number significantly enhances heat transfer performance, with higher stagnation point (Nu_0) and average (Nu_{avg}) Nusselt numbers. Optimal performance was observed at intermediate nozzle-to-plate distances ($h/d\approx4-6$), where turbulence intensity and momentum transfer were maximized. Beyond this range, heat transfer efficiency diminished due to the dissipation of jet momentum and turbulence. The thinning of the thermal boundary layer in the stagnation region was identified as a key factor driving enhanced heat transfer at the impingement point. The study also demonstrated that turbulence intensity plays a pivotal role, especially in the wall-jet region, where it contributes to greater mixing and momentum exchange.

A significant contribution of this research is the confirmation of theoretical models describing jet behavior, including the potential core, distortion regions, and decay characteristics. The experimental data validated the proportional relationships between Reynolds number, centerline velocity, and Nusselt number, providing strong agreement with established theoretical predictions. Additionally, preliminary tests indicated that conduction through the plate thickness accounted for less than 0.5% of the total heat transfer, affirming the reliability of the measurement approach.

This work not only enhances the understanding of impinging jet dynamics but also offers practical guidance for optimizing cooling systems in industrial and engineering applications. Future research could expand upon these findings by exploring the effects of advanced nozzle geometries, pulsating jets, and nanofluids to further improve heat transfer efficiency. Furthermore, the integration of computational fluid dynamics (*CFD*) simulations with experimental analyses could provide a deeper understanding of complex flow and heat transfer mechanisms in impinging jet systems.

Nomenclature

Symbol	Description
h/d	Nozzle-to-plate distance ratio
h_{fg}	Latent heat of vaporization (J/kg)
ρ_v	Vapor density (kg/m³)
U_j	Jet outlet velocity (m/s)
L_{dz}	Distortion zone height (times nozzle diameter, d)
L_{pc}	Potential core length (times nozzle diameter, d)
u/U_j	Dimensionless velocity ratio

Ethical Statement

The author declares that this document does not require ethics committee approval or any special permission.

Conflict of Interest

The author declares no conflict of interest

References

[1] K. Jambunathan, E. Lai, M. A. Moss, and B. L. Button, "A Review of Heat Transfer Data for Single Circular Jet Impingement," Int. J. Heat and Fluid Flow, vol. 13, no. 2, pp. 106–115, 1992.

[2] R. Gordon and J. C. Akfırat, "The Role of Turbulence in Determining the Heat Transfer Characteristics of Impinging Jets," Int. J. Heat and Mass Transfer, vol. 8, pp. 1261–1272, 1965.

[3] E. U. Schlunder and V. Gnielinski, "Heat and Mass Transfer between Surfaces and Impinging Jets," Chem. Ing. Tech., vol. 39, pp. 578–584, 1967.

[4] C. Kistak, A. Taskiran, and N. Celik, "Experimental Analysis of Transient and Steady-State Heat Transfer from an Impinging Jet to a Moving Plate," Heat and Mass Transfer, vol. 60, pp. 1713–1729, 2024.

[5] A.Taşkiran, C.Kıstak, S.Kapan, N.Çelik, and İ. Dağtekin, "Numerical Analysis of Dual Slot Pulsating Nanofluid Impinging Jets", DUJE, vol. 15, no. 4, pp. 881–890, 2024.

[6] G. Bai, G. Gong, and F. Zhao, "Multiple Thermal and Moisture Removals from the Moving Plate Opposite to the Impinging Slot Jet," Appl. Therm. Eng., vol. 66, no. 1–2, pp. 252–265, 2014.

[7] N. Celik and H. Eren, "Heat transfer due to impinging co-axial jets and the jets' fluid flow characteristics," Exp. Therm. Fluid Sci., vol. 33, pp. 715–727, 2009.
[8] K. Baghel et al., "Free Surface Planar Liquid Jet Impingement on a Moving Surface: Interfacial Flow and Heat Transfer Characteristics," J. Mech. Sci. Technol., vol. 36, no. 11, pp. 5537–5549, 2022.
[9] M. Rahimi and R. A. Soran, "Slot Jet Impingement Heat Transfer for the Cases of Moving Plate and Moving Nozzle," J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng., vol. 38, pp. 2651–2659, 2016.
[10] J. Wang, X. Li, and S. A. Elmi, "Research on the Temperature and Thermal Stress of the Roll Quenching Process of Thin Plates," Metals, vol. 14, no. 1, p. 83, 2024.
[11] Sparrow, E.M., and Gregg, J.L., A Boundary Layer Treatment of Laminar Film Condensation, J. Heat Transfer, 81, 13, 1959
[12] Chen, M.M., An Analytical Study of Laminar Film Condensation Part I, J. Heat Transfer, 83, 48, 1961
[13] Çelik, N., Optimum Lüle Tipinin Çarpan Jet Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniv. Fen. Bil. Ens. Elazığ, 2006
[14] Churchill, S.W. and Chu, H.H.S. (1975) Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Vertical Plate. International Journal of Heat and Mass Transfer, 18, 1323-1329.
[15] Kline, S.J., McClintock, F.A., Describing uncertainties in single-sample experiments, Mechanical Engineering 75, 3–8, 1953
[16] Sfeir, A.A., "The Velocity and Temperature Fields of Rectangular Jet", Int. J. Heat and Mass Transfer, 19, 1289-1297, 1976.
[17] Yevdjevıch, V.M., "Diffusion of Slot Jets with Finite Length-Width Ratio", Hydraulic Paper, Colarado State Univ. 2, 1-40, 1966.
[18] Sforza, P.M., Steiger, M.H., & Trentacoste, N., "Studies on Three Dimensional Viscous Jets", AIAA J. 4, 800-806, 1966.
[19] Gauntner, J.W., Livingood, J.N.B., and Hrycak, P., "Survey of Literature on Flow Characteristics of Single Turbulent Jet Impinging on a Flat Plate", NASA TN D-5652 NTIS N70-18963, 1970.
[20] Blevins, R.D., Applied Fluid Dynamics Handbook, Florida, 1992.
[21] Schlichting, H., Boundary Layer Theory, McGraw Hill Co., New York, 1968.
[22] Popiel, C.O., and Trass, O., "The Effect of Ordered Structure of Turbulence on Momentum, Heat and Mass Transfer of Impinging Round Jets, Proc.7th Int. Heat Transfer Conf., Munchen, Germany, September 6-10, 6, 141-146, 1982.
[23] Popiel, C.O., and Trass, O., "Visualization of a Free and Impinging Round Jet", Exp. Thermal Fluid Science, 4, 253-264, 1991.
[24] Lee, D.H., Chung, Y.S. and Kim, D.S., "Turbulent Flow and Heat Transfer Measurements on a curved surface with a Fully Developed Round Impinging Jet", Int. J. Heat and Fluid Flow, 18, 160-169, 1997.
[25] Can, O., "Elektronik Devrelerin Soğutulması ve Jet Püskürtmeli Soğutma Sistemlerinin Analizi" Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1997.
[26] Tani, I., and Komatsu, Y., "Impingement of a Round Jet on a Flat Surface", Proc. of the Eleventh International Congress of Applied Mechanics, (Editor H. Gortler), Springer-Verlag, New York, 672-676, 1966.
[27] Girald, F.,Chia C.J., and Trass, O., " Characterization of the Impingement Region in an Axisymmetric Turbulent Jet", Ind. Eng. Chem. Fundam. 16, 21-28, 1977.

.

Dicle University
Journal of Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/dumf
duje.dicle.edu.tr

Research Article

The Effectiveness of Advanced Cooling Solutions in Managing the Thermal Performance of Lithium-Ion Batteries: A Numerical Study

Serhat AYDIN[1*], Metin UZUN[2]

[1] Cevheri Air, Aircraft Body Engine Maintenance Technical Expert, serhat.aydin@cevheriair.com, Orcid No: 0009-0005-4784-5013
[2] Iskenderun Technical University, Department of Airframe and Powerplant Maintenance, metin.uzun@iste.edu.tr, Orcid No 0000-0002-0744-3491

ARTICLE INFO

Article history:

Received 1 February 2025
Received in revised form 27 February 2025
Accepted 6 March 2025
Available online 30 June 2025

Keywords:

Liquid Cooling Systems, Thermal Management, Cooling Channel Design, Lithium-Ion Batteries, Numerical Analysis

DOI: 10.24012/dumf.1631467

* Corresponding author

ABSTRACT

This study explores the advanced thermal management of lithium-ion batteries (LiBs) using a comprehensive Battery Thermal Management System (BTMS) framework. Employing numerical simulations and experimental validations, the research evaluates three distinct cooling configurations (Case 1, Case 2, and Case 3) under varying coolant flow velocities (0.1 m/s, 0.5 m/s, and 1 m/s) and coolant types (water and ethylene glycol). Incorporating nanofluids, the study demonstrates significant improvements in heat transfer efficiency compared to conventional methods. Findings reveal that higher flow velocities enhance heat dissipation and temperature uniformity. Additionally, water outperforms ethylene glycol due to its superior thermal conductivity. A temperature gradient from 298 K to 318 K underscores the importance of optimized flow distribution and channel geometry. This work not only addresses critical challenges in LiB thermal management but also offers significant insights into the design of safer and more efficient cooling systems for applications such as electric vehicles and renewable energy storage. In addition to providing theoretical insights, this research offers actionable recommendations for the design of such systems. Future directions for this research include the integration of microchannel cooling and phase change materials to further enhance thermal performance.

Introduction

Lithium-ion (LiB) batteries have become the standard for modern energy storage systems, powering a wide range of applications, including electric vehicles (EVs), portable electronics, and renewable energy grids [1–4]. This widespread adoption is primarily due to their high energy density, long cycle life, and relatively low self-discharge rate, making them essential to meet the increasing energy demands of modern technologies [5,6]. However, as the energy density of LiBs increases, heat generation during operation also intensifies due to Joule heating and electrochemical reactions, posing critical thermal management challenges [7,8]. Effective thermal regulation is crucial to ensuring battery safety, enhancing performance, and extending operational life [9].

Thermal challenges associated with LiBs include uneven temperature distribution, capacity degradation, and, in extreme cases, thermal runaway, which can lead to catastrophic battery failure [10,11]. To address these issues, Battery Thermal Management Systems (BTMS) have been extensively researched, with liquid cooling methods gaining prominence due to their superior heat transfer efficiency compared to air-cooling systems [12,13].

Recent advancements in BTMS technology have introduced innovative cooling strategies such as microchannel cooling, phase change materials (PCMs), and nanofluid-based cooling [14–16]. Microchannel cooling systems, known for their compact design and high thermal performance, are particularly effective for high-power applications where space is limited [17]. Similarly, PCMs provide a passive cooling solution by absorbing heat during phase transitions, maintaining temperature uniformity [18]. Additionally, nanofluids, which involve dispersing nanoparticles into traditional coolants like water or ethylene glycol, significantly enhance thermal conductivity and overall cooling performance [19].

The design and optimization of cooling channels are crucial for the effectiveness of BTMS. Factors such as channel geometry, spacing, and flow rate directly influence heat dissipation, pressure drop, and energy efficiency [20,21]. Proper channel design not only improves thermal management but also reduces energy consumption, making it particularly valuable for applications such as EVs and grid energy storage systems [22,23].

This study investigates advanced liquid cooling systems for the thermal regulation of LiBs. Through a combination of numerical simulations and experimental validations, various cooling configurations are evaluated to assess their impact on temperature regulation, flow dynamics, and energy efficiency. By examining three distinct cooling channel designs and incorporating nanofluids, this work aims to provide actionable insights for optimizing BTMS and addressing the growing thermal challenges in high-performance battery systems.

Models and Methods

This study offers a novel contribution to battery thermal management systems (BTMS) by systematically investigating three distinct cooling configurations: Case 1, Case 2, and Case 3 channels. Unlike prior research, which often focuses on a single design, this work provides a comparative evaluation of these configurations under varying coolant flow rates using both water and ethylene glycol. The study explores the impact of three inlet velocities (0.1 m/s, 0.5 m/s, and 1 m/s) on the cooling performance, highlighting their influence on heat dissipation, temperature uniformity, and pressure drop. Furthermore, the incorporation of nanofluids in the cooling process distinguishes this study, demonstrating significant improvements in thermal conductivity and overall system efficiency compared to traditional cooling fluids.

By integrating numerical simulations and experimental validations, the research delivers critical insights into the optimization of channel geometry, flow conditions, and coolant properties for BTMS.

Table 1. Specifications of the battery

Density (kg/m3)	2450
Specific heat (J/kg·K)	1108
Thermal conductivity (W/(m·K))	3.9
Heat generated of each LiB (W/m3)	240,000
Initial temperature (K)	298.15
Length (mm)	118
Width (mm)	63
Height (mm)	13
Nominal capacity (Ah)	8
Nominal voltage(V)	3.2
Charge cut-off voltage (V)	3.8
Discharge cut-off voltage (V)	2.1
Coolant thickness (mm)	5

In this study, water and ethylene glycol based coolants commonly used for battery thermal management were preferred. Alternative coolants such as nanofluid doped coolants (e.g. Al_2O_3-water, CuO-water, TiO_2-water) and dielectric coolants (e.g. Novec 7000, Fluorinert) are also known to be used in the literature. However, these alternatives were not included in the study due to their high cost, stability issues such as precipitation and viscosity increase over time, risks of deposition on heat transfer surfaces and limited availability in commercial applications. Although some dielectric fluids used in electric vehicle batteries have low viscosity and high temperature resistance, water-based solutions are safer in terms of sealing requirements and chemical stability. In addition, within the scope of the targeted study, it is aimed to create a model suitable for real-world applications based on commonly used refrigerants in existing commercial systems. Future studies can further investigate the effects of nanofluid additives on heat transfer efficiency and the effect of dielectric fluids and two-phase cooling systems on battery performance.

These findings contribute to the development of safer, more efficient and durable energy storage systems by addressing key challenges in lithium-ion battery heat management. Case 1 consists of 3 batteries and 2 coolers, Case 2 consists of 2 batteries and 2 coolers, and finally Case 3 consists of 3 batteries and 4 coolers. The cooler length and width are the same as the battery size, but its thickness is taken as 5 mm in this study. Three different designs were tested in this study to evaluate how different fluids can maintain battery temperatures at an optimal level.

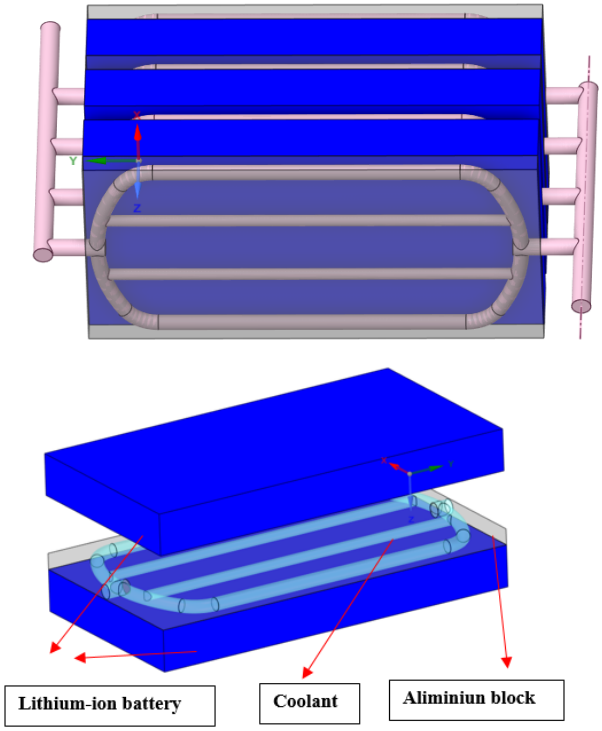


Figure 1. Schematic diagram of BTMS.

Figure 1 illustrates the schematic design of the BTMS, showing the main components, including cooling channels, battery cells, and heat dissipation pathways. In the context of a Battery Thermal Management System (BTMS), the

fluid can be considered incompressible as the velocity of the coolant is significantly lower than the speed of sound. The Reynolds number, one of the main criteria used to determine the flow regime, is related to the viscosity, density, velocity and characteristic length of the fluid. In the Honeycomb Liquid Cooling Plate (HLCP), the flow regime is determined by the dynamic viscosity of the refrigerant and the geometric properties of the cooling plate.

The flow regime is classified in three different cases: Laminar flow: If the Reynolds number is below 2300, the flow is smooth and stratified. Transitional regime: If the Reynolds number is between 2300 and 4000, the flow starts to become irregular. Turbulent flow: If the Reynolds number is above 4000, swirling and irregular flow characteristics are observed.

This classification is critical to understanding how the coolant moves across the surface of the coil. While turbulent flow in particular can provide more effective cooling by increasing the heat transfer coefficient, it can cause excessive pressure losses. The equation used to calculate the Reynolds number is given in Equation (1) (Qian et al., 2016). Figure 1 presents a schematic representation of the cooling structure designed for the Battery Thermal Management System (BTMS). The main components of the system include lithium-ion battery modules, refrigerant channels and an aluminum block for heat dissipation.

The aluminum block is designed to improve heat transfer and thermal uniformity through direct contact with the battery cells. The coolant circulates between the inlet and outlet, transferring heat away from the battery modules. Figure 1 shows a general outline of how the refrigerant flows through the channels, while Figure 2 shows the more detailed internal structure and flow characteristics of the system.

This structure aims to effectively direct the refrigerant and ensure homogeneous temperature distribution on the battery surface. In particular, flow rates, channel design and material selection play a critical role in the safety and performance of the batteries.

$$\mathrm{Re} = \frac{V \bullet d_h}{\mu} \tag{1}$$

The Reynolds number (Re) is a dimensionless quantity that determines the flow regime in a fluid system. It is defined as the ratio of inertial forces to viscous forces and is calculated using the equation.

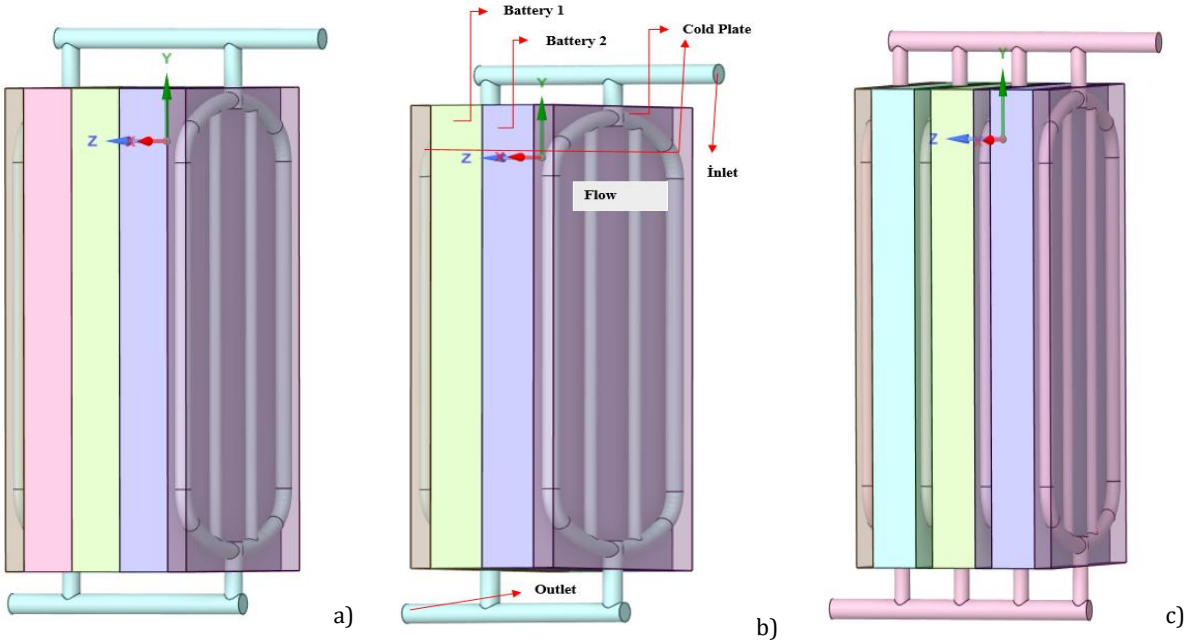


Figure 2. The structure of the battery thermal management (a-Case 1, b-Case 2, c-Case 3)

The flow rate of coolant through the Honeycomb Liquid Cooling Plate (HLCP) is denoted by V, the hydraulic diameter of the coolant channel is denoted by dh, and the kinematic viscosity of the coolant is denoted by μ. In battery cooling systems, the flow regime is a fundamental parameter that determines the efficiency of the heat transfer mechanism. The flow regime is determined by the Reynolds number (*Re*) and can be analyzed in three different regimes: laminar, transitional and turbulent flow. In this study, different flow rates using water and ethylene glycol Reynolds numbers for 0.1m/s, 0.5m/s, 1.0m/s) were calculated. The results obtained are summarized in the table below:

Table 2. Reynolds Number and Flow Regime Classification for Different Fluids and Velocities

Fluid	Hydraulic Diameter (mm)	Viscosity (μ) (Pa·s)	Density (ρ) (kg/m³)	Flow Velocity (m/s)	Reynolds Number (Re)	Flow Regime
Water	5	0,000897	998,2	0,1	557	Laminar
Water	5	0,000897	998,2	0,5	2785	Transitional
Water	5	0,000897	998,2	1	5570	Turbulent
Ethylene Glycol	5	0,015	1111,4	0,1	2000	Transitional
Ethylene Glycol	5	0,015	1111,4	0,5	10000	Turbulent
Ethylene Glycol	5	0,015	1111,4	1	20000	Turbulent

The flow regime in battery cooling systems varies depending on the flow velocity, and while laminar flow is observed at low speeds, as the speed increases, the transition regime and then turbulent flow regime emerges. Especially at speeds of 0.5 m/s and above, turbulence effects become evident. In this study, the SST k-ω turbulence model is preferred because it provides accurate solutions at low Reynolds numbers and accurately models the transition regime. While this model produces more accurate solutions in the low Reynolds region by using the k-ω model near the wall, it switches to the k-ε model in free flow regions and represents the turbulent flow in a wider region. The simulations show that laminar flow is dominant at 0.1 m/s, but the turbulence effect becomes significant at 0.5 m/s and 1.0 m/s. Especially at 1.0 m/s, turbulence is observed to increase the heat transfer coefficient and make the temperature distribution on the battery surface more homogeneous. Therefore, the SST k-ω model is considered as a suitable model for thermal analysis of battery cooling systems because it accurately predicts the transition from laminar to turbulent, captures wall effects well at low velocities, and realistically simulates turbulent flow at high velocities.

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho_W C_W T_W) = \nabla \bullet (k_W \nabla T_W) \tag{2}$$

In this context, ρ_W T_W, k_W and C_W which represent the density, temperature, thermal conductivity and specific heat of the water is shown in equation 2.

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho_B C_B T_B) = -\nabla \bullet (k_B \nabla T_B) + Q_B \tag{3}$$

The parameters ρ_B C_B T_B and k_B represent the density, specific heat capacity, temperature, and thermal conductivity of the lithium-ion battery, respectively. Additionally, Q_B denotes the heat generation rate of a single lithium-ion battery. The energy conservation equation of lithium-ion battery is shown (Qian et al., 2016) in equation (3). This equation assumes that heat transfer occurs mainly via conduction and that radiation effects are negligible. The thermal model considers an unsteady (transient) state, as the battery temperature changes over time due to charge and discharge cycles. For this study, the internal heat generation rate was taken as 240,000 W/m³, which is consistent with experimental findings in similar research (Qian et al., 2016). The equation helps determine the temperature distribution in battery cells, which directly impacts cooling system design by optimizing heat dissipation pathways and preventing thermal runaway.

Table 1 presents key specifications for the battery, including its density (2450 kg/m³), specific heat (1108 J/kg·K), and thermal conductivity (3.9 W/m·K), which are crucial for understanding the battery's heat generation and thermal management needs. The battery generates significant heat (240,000 W/m³), and its relatively low thermal conductivity means that an efficient cooling system is essential to prevent overheating. The physical dimensions of the battery (118 mm length, 63 mm width, 13 mm height) further define the available surface area for heat dissipation, while the 5 mm coolant thickness plays a role in cooling effectiveness. Table 3 provides properties of the materials used for thermal management, including an aluminum block with a high thermal conductivity (238 W/m·K), which helps dissipate heat from the battery efficiently. Water, with a high specific heat (4182 J/kg·K) but lower thermal conductivity (0.6 W/m·K), is used as a coolant to absorb heat, while ethylene glycol offers a balance of density (1111.4 kg/m³) and thermal conductivity (0.252 W/m·K) for effective heat transfer in various thermal systems.

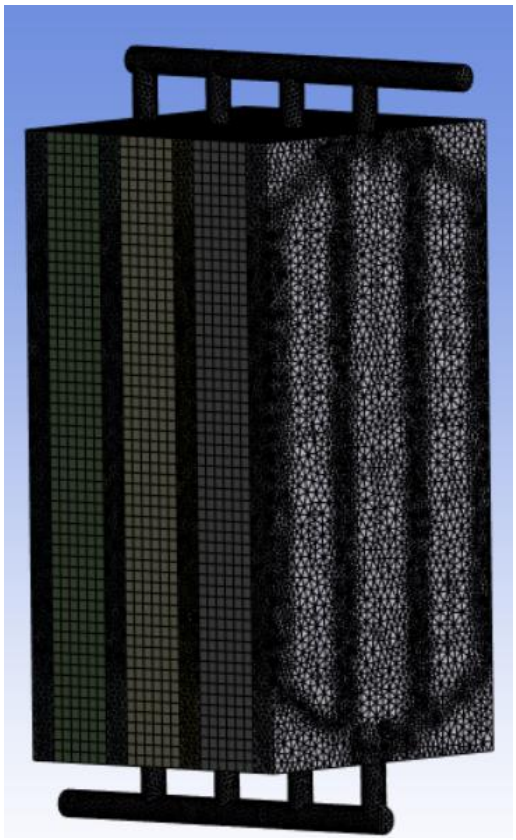
The battery thermal properties used in the study are based on the properties of widely used lithium-ion cells. The parameters used in the simulations, such as thermal conductivity, heat capacity and heat generation rate, were determined based on lithium-ion battery cells that are frequently referenced in the literature. However, in order to improve the accuracy of the model, the specific characteristics of the battery type used are detailed and the boundary conditions are clearly defined. Heat generation is modeled based on battery charge and discharge rates, and surface boundary conditions are determined by considering natural convection and forced convection effects due to the cooling fluid. In this framework, additional explanations are provided in the relevant section for a clearer understanding of the thermal properties and boundary conditions.

Table 3. Properties of the employed materials.

Thermo-physical properties	Aluminum block	Water	ethylene-glycol
Density (kg/m3)	2700	998.2	1111.4
Specific heat (J/kg·K)	900	4182	2415

Thermal conductivity (W/(m·K))	238	0.6	0.252

Table 3 presents the thermo-physical properties of the materials employed for thermal management, including aluminum, water, and ethylene glycol. Aluminum, with a density of 2700 kg/m³ and a thermal conductivity of 238 W/m·K, is used primarily for heat dissipation due to its high thermal conductivity, making it highly effective at transferring heat away from the battery. Water, with a density of 998.2 kg/m³ and a specific heat of 4182 J/kg·K, plays a vital role as a coolant due to its ability to absorb and store a significant amount of thermal energy, although its lower thermal conductivity (0.6 W/m·K) means it requires efficient flow design to transfer heat effectively. Ethylene glycol, with a density of 1111.4 kg/m³ and a thermal conductivity of 0.252 W/m·K, is used for its favorable properties in cooling systems, offering a balance between fluid density and heat transfer characteristics, particularly in lower temperature environments or when a lower freezing point is required.



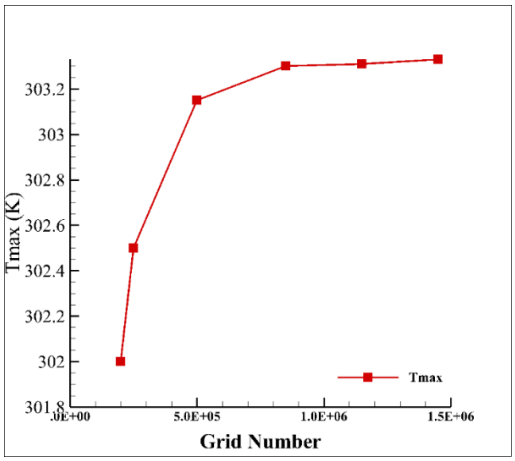


Figure 3. Meshing method.

The computational fluid dynamics (CFD) model, boundary conditions and assumptions used in the study are clearly defined. The Shear Stress Transport (SST) k-ω model is used for turbulence modeling, which is preferred because it produces accurate results at low Reynolds numbers and captures the transition regime accurately. In the simulations, wall functions were applied to accurately represent the flow in turbulent regions.

A mesh independence test was performed to evaluate the effect of the mesh resolution on the results. As part of the mesh independence test, the number of elements was varied from 300,000 to 1,500,000 and the maximum battery surface temperatures were compared. After 750,000 elements, the variation in temperature values dropped below 0.2%, so the final simulations were performed with a 750,000 element network structure, taking into account the balance of computational cost and accuracy. Numerical simulations were performed in ANSYS Fluent software and an irregular tetrahedral mesh structure was used to optimize accuracy and computational efficiency. In order to capture in detail the flow dynamics and thermal variations in the cooling ducts, the mesh element size was set to 1 mm. Thinner elements are used in areas where heat exchange is intense, especially on the walls of the cooling channels. In terms of mesh quality, the orthogonal quality is 0.257 and the maximum skewness is 0.74, which are within acceptable limits in terms of solution accuracy.

The results of the network independence test show that once the network resolution reaches a certain level (750,000 elements), its effect on the results becomes negligible. After 1,000,000 elements, the rate of temperature change reaches 0.05% and it is determined that using a higher resolution mesh increases the computation time but contributes minimally to the results. Therefore, considering the balance of computation time and accuracy, the optimal mesh resolution was determined as 750,000 elements.

Table 4. The results of the network independence test are given in the table below:

Mesh Element Sayısı	Tmax (K)	Fark (%)
300,000	302.1	-
500,000	303.0	0.9%
750,000	303.2	0.2%
1,000,000	303.25	0.05%
1,500,000	303.27	0.01%

These results clearly show that the effect of mesh resolution on the solution becomes negligible after 750,000 elements. Thus, computation time is optimized while ensuring simulation accuracy.

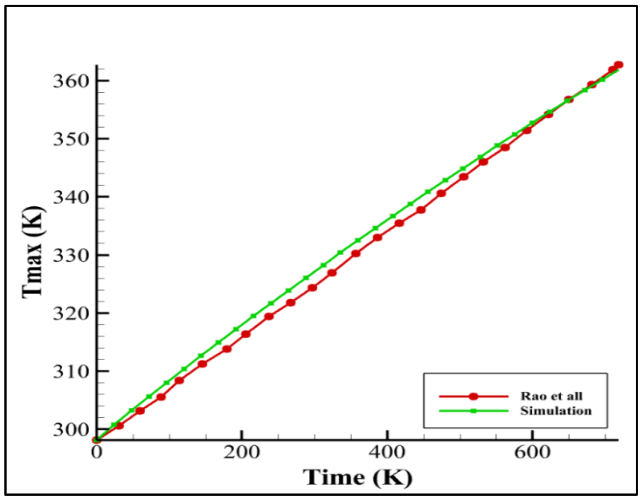


Figure 4. Validation of the heat generation model.

The validity of the heat generation model was established through a comparative analysis of simulation outputs and experimental data, yielding an error margin of no more than 5%. This figure shows the temperature profiles of the battery surface under a heat generation rate of 240,000 W/m³, demonstrating consistent agreement between numerical predictions and experimental observations. Validation confirms the model's ability to accurately represent lithium-ion battery thermal behavior during operation.

Conclusion and Discussion

In this section, the results of the thermal and flow analyses of the cooling system are presented and discussed. The visualization of temperature and velocity distribution across the battery pack and coolant channels provides insights into the effectiveness of the implemented cooling strategies. The following figures illustrate how variations in coolant flow rates, coolant types, and the positioning of the batteries influence the overall thermal performance of the system. These results highlight key factors such as the temperature gradient across the battery pack, the impact of coolant flow velocity on heat dissipation, and the differences in performance between water and ethylene glycol as coolants. The discussion focuses on identifying potential design improvements, optimizing flow distribution, and enhancing cooling efficiency to ensure safe and efficient operation of the battery system.

Results of case 1

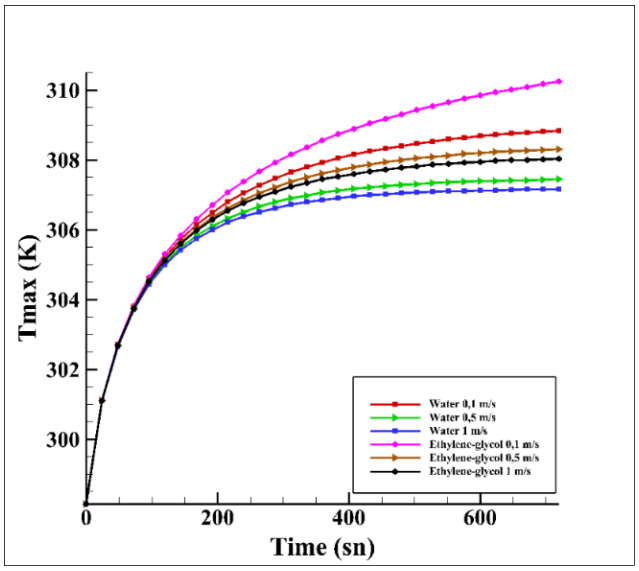


Figure 5. Coolant water and ethylene glycol at different fluid velocities for Case 1

Figure 5 shows the battery temperature distribution for three different coolant flow rates (0.1 m/s, 0.5 m/s and 1 m/s) and two different coolant types (water and ethylene glycol). The results reveal that increasing the flow rate decreases the temperature of the battery. At 0.1 m/s, higher temperature values are observed, while cooling becomes more efficient at higher speeds. In particular, when water was used as the coolant, the temperature reached about 308.15 K at 0.1 m/s and decreased to 303.15 K at 1 m/s. When ethylene glycol was used, the temperature was around 307.15 K at 0.1 m/s and decreased to about 301.15 K at 1 m/s.

These results show that both the flow rate and the type of coolant play an important role in battery heat dissipation.

Although ethylene glycol has lower thermal conductivity compared to water, more efficient heat transfer was achieved at higher flow rates, resulting in larger temperature drops. However, higher flow rates also mean increased pump power requirements, which can affect system efficiency. Therefore, determining the optimum coolant type and flow rate in battery thermal management systems is a critical factor in terms of both thermal performance and energy consumption.

Figure 6 presents a comprehensive representation of the temperature and velocity distributions within the cooling system. On the left side, the overall battery pack is displayed, followed by individual battery temperature profiles, highlighting the variations in thermal behavior due to the batteries' positions. The first battery, closest to the coolant inlet, exhibits the lowest temperature, while the last battery, positioned near the outlet, reaches the highest temperature due to reduced cooling efficiency along the

flow path. Below the battery pack, the coolant temperature distribution is shown, indicating a steady increase from the inlet to the outlet, reflecting the heat absorption as the coolant moves through the system. The coolant velocity is also visualized, with a clear decrease in velocity from the inlet to the outlet due to frictional losses and the design of the cooling channels. This analysis underscores the importance of optimizing both temperature and flow distribution to enhance the cooling performance and thermal management of the battery pack.

Table 5. Temperature and velocity distribution in the battery cooling system for Case 1, including maximum and minimum cell temperatures for different coolant types and flow velocities.

	Fluid Type	Water			Ethylene-glycol		
	Fluid Velocity	0,1 m/s	0,5 m/s	1 m/s	0,1 m/s	0,5 m/s	1 m/s
Cell 1	Tmax (K)	305,22	304,11	303,92	306,44	304,82	304,59
Cell 2		305,24	304,12	303,927	306,45	304,83	304,6
Cell 1	Tmin(K)	299,27	298,62	298,48	300,53	299,26	299,11
Cell 2		299,39	298,66	298,52	300,56	299,3	299,11

The table 5. shows the maximum (Tmax) and minimum (Tmin) temperature values for different coolant types (water and ethylene-glycol) and varying flow rates (0.1 m/s, 0.5 m/s, 1 m/s) in the battery cells for Case 1. The results show that increasing the flow rate decreases the Tmax values of the coils and decreases the Tmin values to lower levels, making the temperature distribution more balanced. Water provides a more efficient cooling by providing lower Tmax and Tmin values, while ethylene-glycol shows a higher but more stable temperature distribution. Especially high Tmax values pose a critical risk to the thermal safety of batteries, while balancing Tmin levels reduces the temperature difference between cells and improves battery performance. These data show that optimal flow rate and coolant selection in battery cooling systems play an important role in preventing battery overheating and extending battery life by stabilizing operating temperatures.

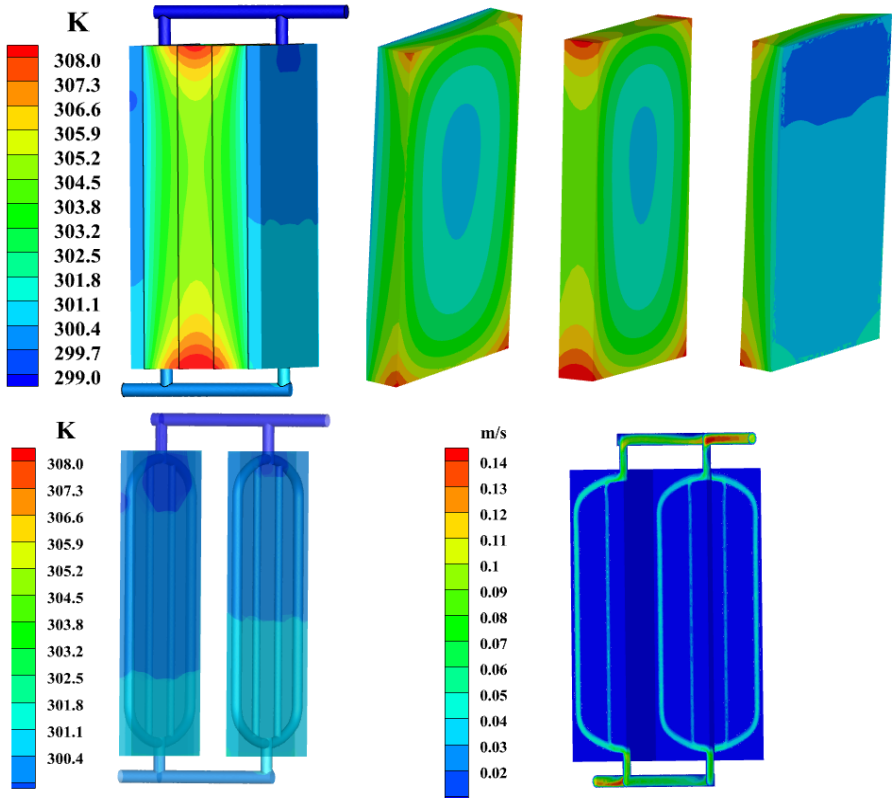


Figure 6. Temperature and speed distribution of battery, coolant and fluid for case 1

Figure 6 visually presents the temperature and velocity distribution in the battery pack, refrigerant and liquid for Case 1. In the Case 1 configuration, there are 3 batteries and 2 heat sinks and in this structure, the refrigerant enters at the designated inlet point, circulates between the batteries and leaves the system at the outlet point.Battery surface temperature distribution: The surface temperatures of the coils change with the flow of the fluid, with the coils in the inlet zone having lower temperatures and the coils near the outlet having higher temperatures. This can be explained by the fact that the coolant absorbs heat as it travels and its temperature increases towards the outlet. Refrigerant velocity variation: While the fluid velocity is highest in the inlet zone (inlet), the velocity decreases as it moves through the ducts due to wall friction and pressure losses and reaches lower values in the outlet zone (outlet). In narrow ducts, local variations in velocity can be observed due to flow diversion, which can affect the heat transfer between the coils.

Results of case 2

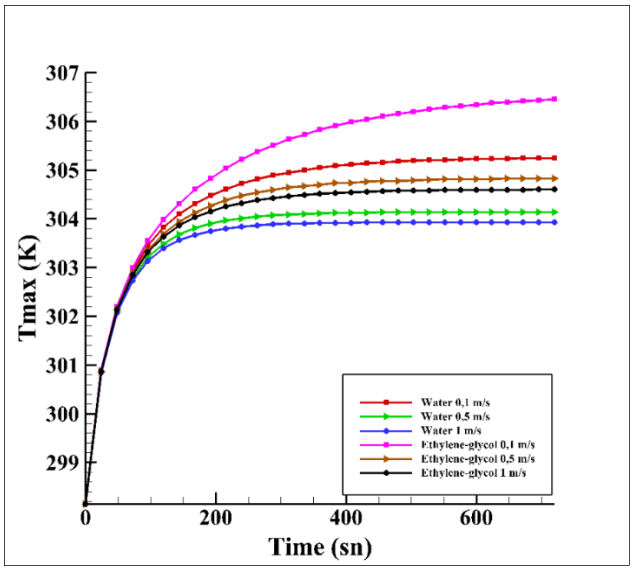


Figure **7.** Coolant water and ethylene glycol at different fluid velocities for Case 2

Temperature distribution of the coolant: As the coolant comes into contact with the batteries, it absorbs heat and its temperature increases. The temperature increase is more pronounced especially in the outlet region of the battery modules, which necessitates optimization of the cooling channel design to ensure a homogeneous temperature distribution on the battery surface. Cooling channel design and flow direction: The figure visualizes the layout of the cooling channels and the path of the fluid. It shows in detail how the fluid is directed from the inlet to the outlet and how the cooling process takes place.This analysis shows that higher flow rates provide more homogeneous temperature distribution over the battery surface, but local temperature differences occur at lower rates. As the glycol, depending on the fluid velocity (0.1 m/s, 0.5 m/s and 1 m/s). As the refrigerant velocity increases, a significant decrease in the battery temperature is observed for both refrigerants. At 0.1 m/s, the temperature remains at higher levels, especially for ethylene glycol, which has a lower thermal conductivity.

When water is used, the battery temperature reaches about 308.15 K at 0.1 m/s and drops to about 303.15 K at 1 m/s. Similarly, with ethylene glycol, the temperature is about 307.15 K at 0.1 m/s and decreases to about 301.15 K at 1 m/s. The results show that higher flow rate increases heat dissipation, resulting in a more homogeneous temperature distribution. Although ethylene glycol has lower thermal conductivity compared to water, the increased flow rate compensates for this disadvantage, resulting in larger temperature drops. However, localized hot spots can occur at low flow rates, which can adversely affect the long-term lifetime of the battery. These results highlight the importance of optimizing the coolant type and flow rate in battery thermal management and show that it is critical to minimize the thermal stress on battery cells.

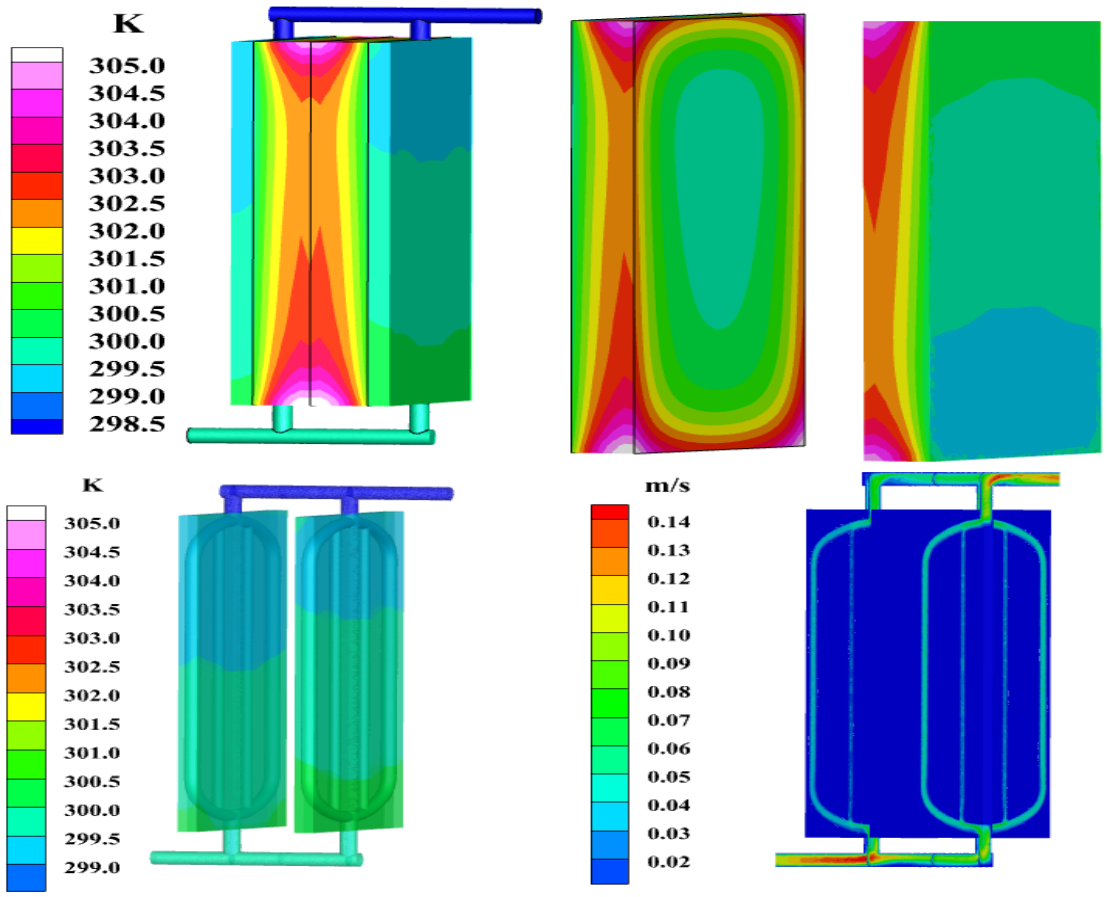


Figure 8. Temperature and speed distribution of battery, coolant and fluid for case 2

Table 6 shows the effect of different coolant types (water and ethylene-glycol) and varying flow rates (0.1 m/s, 0.5 m/s, 1 m/s) on the maximum (Tmax) and minimum (Tmin) temperature values in the battery cells in the battery cooling system for Case 2. The results show that water provides more effective cooling for the batteries with lower Tmax and Tmin values. While Tmax values decrease with increasing flow rate, Tmin values create a more balanced temperature distribution. Although the Tmax values of ethylene-glycol are higher compared to water, the temperature change is more stable and the temperature differences between the cells are relatively reduced. This highlights the critical role of fluid type and velocity on temperature control in battery thermal management.

Table 6. Temperature and velocity distribution in the battery cooling system for Case 2, including maximum and minimum cell temperatures for different coolant types and flow velocities.

	Fluid Type	Water			Ethylene-glycol		
	Fluid Velocity	0,1 m/s	0,5 m/s	1 m/s	0,1 m/s	0,5 m/s	1 m/s
Cell 1	Tmax (K)	307,9	306,51	306,23	309,41	307,42	307,15
Cell 2		308	306,57	306,29	309,43	307,46	307,16
Cell 3		308,83	307,43	307,15	310,23	308,31	308
Cell 1	Tmin (K)	299,79	298,91	298,7	301,46	299,78	299,58
Cell 2		299,97	299	298,79	301,51	299,84	299,59
Cell 3		300,76	299,68	299,45	302,16	300,5	300,28

Figure 8 presents a detailed analysis of the temperature and velocity distributions within the cooling system. On the left side, the overall battery pack is shown, followed by the individual batteries placed within the system. Each battery's temperature is depicted separately, illustrating the thermal behavior based on its position within the pack. The first battery, closest to the coolant inlet, maintains the lowest temperature, while the last battery, near the outlet,

experiences the highest temperature due to decreased cooling efficiency as the coolant travels through the system.

Below the battery pack, the coolant temperature distribution is shown, indicating the progressive increase in temperature as the coolant moves along the cooling channels. The velocity distribution of the coolant is also presented, illustrating how the flow speed varies from the inlet to the outlet, with the coolant velocity gradually decreasing as it flows through the system. This visualization emphasizes the importance of flow optimization to ensure even temperature distribution and effective cooling throughout the battery pack.

Results of case 3

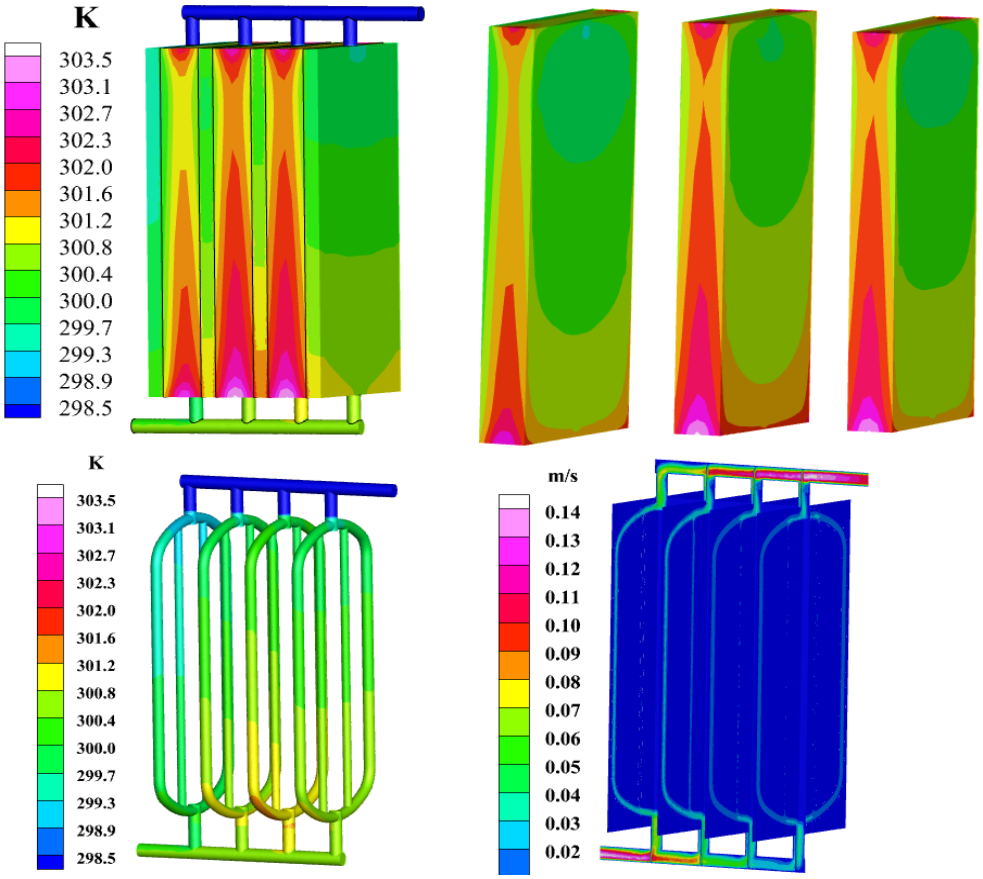


Figure 9. Temperature and speed distribution of battery, coolant and fluid for case 3

Figure 9 presents in detail the temperature and velocity distribution in the battery cooling system and compares the thermal performance of different fluids (water and ethylene glycol) at various flow rates. In the figure, the battery pack overview is on the left side and the temperature profiles of the batteries are presented on the right side. It can be clearly observed how the temperature distribution changes depending on the location of the coils in the system.

When the temperature distribution in the cooling system is examined, it is seen that the temperature of the battery close to the inlet point is at the lowest level, while the temperature increases as it approaches the outlet point. This increase can be explained by the fact that the refrigerant absorbs heat as it progresses and its temperature rises towards the outlet. Especially when ethylene glycol is used, the temperature increase at the outlet point is more pronounced and it is confirmed that it has a lower heat transfer capacity compared to water. The figure also shows the velocity profile of the refrigerant. While the fluid velocity is highest in the inlet region, it is observed that the velocity decreases towards the outlet due to friction and pressure drop on the channel walls. This may affect the cooling performance and cause temperature differences on the battery surface. Especially at low speeds, it is observed that the coils in the outlet area cannot be cooled sufficiently.

The thermal performances of water and ethylene glycol at different speeds are also compared in the figure. Due to its high thermal conductivity, water provides more efficient cooling of the coils, especially at high flow rates. In contrast, ethylene glycol has a low thermal conductivity, which keeps the temperature of the batteries at higher levels under the same conditions. At low flow rates (0.1 m/s), there is no significant temperature difference between the two fluids, but when the flow rate is increased

to 1.0 m/s, the superiority of water in cooling performance becomes clearer.

This analysis shows that not only thermal conductivity but also operating conditions, freezing point and fluid viscosity should be taken into account when selecting the optimum refrigerant for battery cooling systems. Figure 9 shows how the battery temperature distribution varies with factors such as fluid selection and flow rate, providing a critical decision point in engineering design.

Table 7. Temperature and velocity distribution in the battery cooling system for Case 3, including maximum and minimum cell temperatures for different coolant types and flow velocities.

	Fluid Type	Water			Ethylene-glycol		
	Fluid Velocity	0,1 m/s	0,5 m/s	1 m/s	0,1 m/s	0,5 m/s	1 m/s
Cell 1	Tmax (K)	303,33	301,47	301,11	304,49	302,21	301,71
Cell 2		303,39	301,53	301,21	304,78	302,38	301,85
Cell 3		302,85	301,24	301,033	304,44	302,08	301,59
Cell 1	Tmin (K)	299,73	298,6	298,42	300,822	299,19	298,87
Cell 2		299,73	298,65	298,49	301,31	299,42	299,04
Cell 3		299,22	298,43	298,35	301,25	299,05	298,76

Table 7 shows the temperature variations in the battery cells for Case 3. When water was used, the Tmax values ranged from 303.33 K to 301.11 K, while when ethylene-glycol was used, they were measured between 304.49 K and 301.71 K. As the flow rate increased, Tmax decreased while Tmin values became more stable. In terms of Tmin, water presented values between 299.22 K and 298.42 K, while ethylene-glycol presented values between 301.25 K and 298.76 K. Water provides a more effective cooling with lower maximum temperature values, while ethylene-glycol offers a higher but more stable temperature distribution.

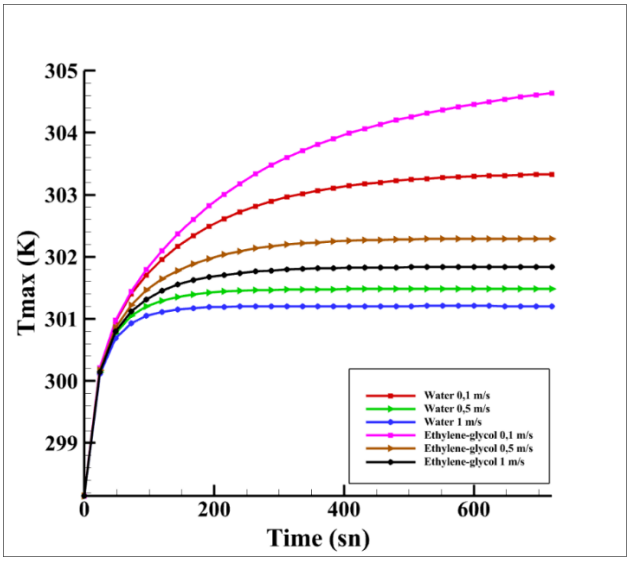


Figure 10. Coolant water and ethylene glycol at different fluid velocities for Case 3

Figure 10 illustrates the temperature variation of the battery with respect to the coolant flow velocity (0.1 m/s, 0.5 m/s, and 1 m/s) and two different types of coolants: water and ethylene glycol. The analysis shows a clear inverse relationship between flow velocity and temperature. As the coolant flow velocity increases, the temperature of the battery decreases due to more effective heat removal. For water, the temperature at 0.1 m/s reaches approximately 309.15 K, but it decreases to around 303.15 K at a flow velocity of 1 m/s. In contrast, for ethylene glycol, the temperature is slightly higher than water at all velocities. At 0.1 m/s, the battery temperature is about 308.15 K, while it reduces to 302.15 K at 1 m/s. These results highlight that despite water having a better heat dissipation capacity due to its higher thermal conductivity, both coolants benefit from higher flow velocities in reducing battery temperature, with water consistently providing better thermal management.

In order to evaluate the accuracy of the numerical model presented in this study, comparisons were made with experimental studies in the literature [24] investigated the effect of cyclic heat pipe and graphite sheet inserts on the cooling performance of a new generation battery thermal management system for electric vehicles. The data obtained in this study are comparable to the findings presented by our numerical model in terms of battery temperature control. Similarly, Chen et al [25] evaluated the effectiveness of a symmetric air-cooled system on battery thermal management and analyzed in detail how the flow channel structure affects the temperature distribution. Furthermore, another study [26] investigated how the battery pack structure can be optimized to improve the cooling efficiency of parallel air-cooled battery management systems.

The model presented in the present study shows a high level of agreement in terms of temperature distribution and cooling efficiency when compared with the experimental findings in the aforementioned literature. The turbulence model and heat transfer calculation methods used in the numerical analysis are consistent with the techniques proposed in the literature and support the reliability of the model. In this context, the findings are in line with previous studies on battery thermal management systems.

In order to increase the practical applicability of the study and emphasize the impact of the results in real-world scenarios, the following points can be addressed:

The battery thermal management system analyzed in this study can be used in a wide range of applications such as electric vehicles, energy storage systems and industrial power systems. Since overheating of batteries in electric vehicles can lead to both performance loss and safety risks, the developed cooling system can optimize the battery temperature and provide a safer and longer life. It can also be used to reduce the effects of heat build-up during fast charging, thus improving battery charging efficiency.

In terms of energy storage systems, temperature control is a critical factor in electricity storage systems supplied from renewable energy sources. Especially in lithium-ion battery-based energy storage facilities, temperature differences can cause imbalances between battery modules, leading to capacity loss. The liquid-cooled thermal management system proposed in this study can prolong battery life and improve system reliability by ensuring temperature uniformity in such energy storage applications.

However, the constraints and challenges in practical applications of the system must also be addressed. First of all, the design and integration of the cooling system needs to take into account the additional weight and volume it can add. Since the size and weight of the battery pack in electric vehicles directly affects energy efficiency, the cooling circuit needs to be optimized to be lightweight and compact. Furthermore, pump and liquid circulation systems can increase energy consumption, so the design of the system should balance between optimal cooling performance and minimum energy consumption.

In conclusion, the thermal management system developed in this study offers significant advantages for electric vehicles, energy storage systems and industrial applications, and has the potential to extend battery life, especially in scenarios requiring fast charging and long-term use. However, factors such as cost, design optimization and energy consumption need to be taken into account for the commercial applicability of the system.

Conclusion

This study comprehensively analyzed the thermal and flow characteristics of a battery thermal management system (BTMS) used in lithium-ion batteries (LiBs), considering different coolant types (water and ethylene glycol) and flow velocities (0.1 m/s, 0.5 m/s, and 1 m/s). The results demonstrated that the temperature distribution within the battery pack is highly sensitive to both the coolant flow rate and the type of coolant employed. As the coolant flow velocity increased, there was a noticeable decrease in the battery temperature, indicating that higher flow rates contribute to more efficient heat dissipation. Water, with its higher thermal conductivity, was found to be more effective in reducing the temperature of the batteries, particularly at higher flow velocities, compared to ethylene glycol. Ethylene glycol, despite its lower thermal conductivity and higher exit temperature, still performed reasonably well, albeit with slightly higher temperatures than water, particularly at lower flow velocities.

The temperature gradient observed within the battery pack ranged from 298 K at the coolant inlet to 318 K at the outlet, highlighting the need for optimizing the flow distribution to prevent thermal hotspots. The analysis revealed that while the coolant temperature increased along the flow path, the temperature rise was more pronounced when ethylene glycol was used instead of water, indicating the need to consider coolant properties in the design phase. Furthermore, the velocity distribution of the coolant showed a decrease from the inlet (1 m/s) to the outlet (0.3 m/s), primarily due to frictional losses and the geometry of the cooling channels. This velocity reduction can affect the efficiency of the cooling process and emphasizes the importance of optimizing channel design to minimize friction and maintain effective coolant flow.

The results highlight how coolant flow rate and type significantly affect battery thermal management efficiency. A careful balance between flow rate, coolant type, and channel geometry is essential for maintaining uniform cooling across the entire battery pack, thereby improving the overall performance and lifespan of the system. The results also suggest that future improvements could focus on further optimizing the flow channel geometries to reduce friction losses and enhance flow uniformity. Additionally, exploring advanced cooling techniques, such as microchannel or phase change material (PCM) cooling, could further enhance thermal management efficiency. Long-term studies on the performance of these cooling systems under varying operating conditions would also provide valuable insights into the sustainability and reliability of the system over time.

In conclusion, this study provides valuable data on the importance of cooling system design in battery thermal management. By optimizing the coolant flow velocity, type, and channel design, significant improvements in battery temperature control and system efficiency can be achieved, contributing to safer, more durable, and higher-performing energy storage solutions.

In this study, a liquid cooling system for battery thermal management is analyzed and different battery configurations and hybrid cooling solutions can be evaluated in the future. In particular, hybrid cooling systems based on a combination of air and liquid cooling offer an important alternative to optimize thermal management of batteries and improve energy efficiency. Hybrid systems can reduce energy consumption by utilizing liquid cooling at high power demands and supplemented with air cooling at lower loads. Furthermore, the impact of different battery pack configurations on thermal performance can be studied. Modular battery systems can offer a more flexible structure in terms of thermal management and the effect of different battery cell configurations on temperature uniformity can be investigated. In addition, the potential advantages of phase change materials (PCMs) and nanofluid doped refrigerants on thermal management can be evaluated. PCMs can provide a passive cooling mechanism against sudden temperature spikes of batteries, reducing temperature

fluctuations and extending battery life. Nanofluid doped coolants can increase the efficiency of the cooling system by increasing the heat transfer capacity.

In future work, battery thermal management strategies can be further optimized through experimental validation and real-world applications. The proposed cooling system can be tested in electric vehicles (EVs) under real driving conditions to evaluate its impact on battery lifetime, fast charging efficiency and overall energy consumption. It can also be applied in large-scale energy storage systems to analyze its thermal stability and operational safety during variable power demands. To improve the accuracy of the study, future research should include experimental validation with prototype battery packs and compare simulation results with actual temperature distributions. Hybrid cooling systems combining liquid and air cooling can be investigated to optimize energy efficiency, while AI-assisted cooling algorithms can be developed to dynamically adjust coolant flow according to battery load conditions. These developments will ensure that battery cooling technologies are reliable and scalable not only in simulation but also in real-world applications.

Ethics committee approval and conflict of interest statement

There is no need to obtain permission from the ethics committee for the article prepared. There is no conflict of interest with any person / institution in the article prepared.

References

[1] J. M. Tarascon and M. Armand, "Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries," Nature, vol. 414, no. 6861, pp. 359–367, 2001,

[2] S. Megahed and B. Scrosati, "Lithium-ion rechargeable batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 51, no. 1–2, pp. 79–104, 1994,

[3] A. Pesaran, "Battery thermal management in EVs and HEVs: Issues and solutions," in *Advanced Automotive Battery Conference*, Las Vegas, Nevada, USA, pp. 34–49, 2001.

[4] X. Feng, M. Ouyang, X. Liu, L. Lu, Y. Xia, and X. He, "Thermal runaway mechanism of lithium-ion battery for electric vehicles: A review," *Energy Storage Materials*, vol. 10, pp. 246–267, 2018,

[5] G. Li, "Promotion of practical technology of the thermal management system for cylindrical power battery," *Energy Informatics*, vol. 7, no. 1, p. 33, 2024,

[6] J. Ren, X. Wang, Y. Zhao, and L. Chen, "Battery thermal management system by employing different phase change materials with SWCNT nanoparticles to obtain better battery cooling performance," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 61, p. 104987, 2024.

[7] S. Argade and A. De, "Optimization study of a Z-type airflow cooling system of a lithium-ion battery pack," *Physics of Fluids*, vol. 36, no. 6, 2024,

[8] M. Hajialibabaei, M. M. Saghir, and M. Z. Saghir, "A critical review of the straight and wavy microchannel heat sink and the application in lithium-ion battery thermal management," *International Journal of Thermofluids*, vol. 14, p. 100153, 2022.

[9] V. V. Tyagi, S. C. Kaushik, S. K. Tyagi, and T. Akiyama, "Development of phase change materials based microchannel thermal management system for high heat flux electronic devices," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 3, pp. 1373–1391, 2011.

[10] Ortiz, Y., Arévalo, P., Peña, D., & Jurado, F. (2024). Recent advances in thermal management strategies for lithium-ion batteries: a comprehensive review. Batteries, 10(3), 83.

[11] H. Jeon, J. Kim, S. Lee, S. H. Lee, and J. H. Park, "Cooling strategy optimization of cylindrical lithium-ion battery pack via multi-counter cooling channels," *Energies*, vol. 16, no. 23, p. 7860, 2023.

[12] Ahmadian-Elmi, M., & Zhao, P. (2024). Review of thermal management strategies for cylindrical lithium-ion battery packs. Batteries, 10(2), 50.

[13] Kurre, S. K., Arya, S., & Yadav, J. (2024). Thermal analysis of batteries of electrical vehicle battery for effective thermal management. Materials Today: Proceedings, 99, 63-69.

[14] Xu, H., Zhang, X., Xiang, G., & Li, H. (2021). Optimization of liquid cooling and heat dissipation system of lithium-ion battery packs of automobile. Case Studies in Thermal Engineering, 26, 101012.

[15] Garud, K. S., Tai, L. D., Hwang, S. G., Nguyen, N. H., & Lee, M. Y. (2023). A review of advanced cooling strategies for battery thermal management systems in electric vehicles. Symmetry, 15(7), 1322.

[16] Wu, C., Sun, Y., Tang, H., Zhang, S., Yuan, W., Zhu, L., & Tang, Y. (2024). A review on the liquid cooling thermal management system of lithium-ion batteries. Applied Energy, 375, 124173.

[17] Zhang, J., Shao, D., Jiang, L., Zhang, G., Wu, H., Day, R., & Jiang, W. (2022). Advanced thermal management system driven by phase change materials for power lithium-ion batteries: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 159, 112207.

[18] Son, Y. W., Kang, D., & Kim, J. (2023). Passive battery thermal management system for an unmanned aerial vehicle using a tetrahedral lattice porous plate. Applied Thermal Engineering, 225, 120186.

[19] Mali, V., Saxena, R., Kumar, K., Kalam, A., & Tripathi, B. (2021). Review on battery thermal management systems for energy-efficient electric vehicles. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 151, 111611.

[20] Qian, Z., Li, Y., & Rao, Z. (2016). Thermal performance of lithium-ion battery thermal management system by using mini-channel cooling. Energy Conversion and Management, 126, 622-631.

[21] Rahmani, A., Dibaj, M., & Akrami, M. (2024). Recent advancements in battery thermal management systems for enhanced performance of Li-ion

batteries: A comprehensive review. Batteries, 10(8), 265.
[22] Maknikar, S. K., & Pawar, A. M. (2023). Application of phase change material (PCM) in battery thermal management system (BTMS): A critical review. Materials Today: Proceedings.
[23] Ye, J., Aldaher, A. Y. M., & Tan, G. (2023). Thermal performance analysis of 18,650 battery thermal management system integrated with liquid-cooling and air-cooling. Journal of Energy Storage, 72, 108766.
[24] M. Bernagozzi, A. Georgoulas, N. Miché, C. Rouaud, M. Marengo, Novel battery thermal management system for electric vehicles with a loop heat pipe and graphite sheet inserts, Applied Thermal Engineering, 194 (2021), 117061.
[25] K. Chen, Y. Chen, Y. She, M. Song, S. Wang, L. Chen, Construction of effective symmetrical air-cooled system for battery thermal management, Applied Thermal Engineering, 166 (2020), 114679.
[26] K. Chen, M. Song, W. Wei, S. Wang, Design of the structure of battery pack in parallel air-cooled battery thermal management system for cooling efficiency improvement, International Journal of Heat and Mass Transfer, 132 (2019), 309–321.

Dicle University
Journal of Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/dumf
duje.dicle.edu.tr

Araştırma Makalesi / Research Article

Savunma Sanayisinde Kullanılan HS 188 Süperalaşımının Oksidasyonu Üzerine Nitrasyon Etkisinin İncelenmesi

Investigation of the Effect of Nitriding on the Oxidation of HS 188 Superalloy Used in the Defense Industry

Merve Kevkir[1], Nesrin Kelebek[2], Özge Saltan[3], Burcu Nilgün Çetiner[4]

[1] Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, mervekevkir34@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-1059-4518

[2] Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, nesrinkelebek1@gmail.com,
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-4143-6782

[3] Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, ozge.saltan@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-1171-9854

[4] Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, nilgun.cetiner@marmara.edu.tr,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3742-4929

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 7 Mart 2025
Revizyon 12 Mayıs 2025
Kabul 26 Mayıs 2025
Online 30 Haziran 2025

Anahtar Kelimeler:

HS 188® süper alaşımı,
Gaz nitrasyon
izotermal oksidasyon

ÖZ

HAYNES 188 (HS 188) alaşımları, yüksek sıcaklık dayanım özellikleri sayesinde içten yanmalı motor bileşenleri, yanma odası ve roket nozulu gibi oksidatif ortamlara uzun süreli maruz kalmaya dayanıklıdır ve bu nedenle uçak ve tank motorları için uygundur. Bu çalışmada, HS 188 alaşımından altlıkların üzerine uygulanacak gaz nitrasyonu prosesi aracılığıyla yüzey ve yüzey altında oksidasyon direncinin artırılması hedeflenmektedir.

Çalışmanın kapsamı içinde, malzeme temini sağlanmış ve malzemenin karakterizasyonu ile metalografik incelemesi gerçekleştirilmiştir. Numuneler, gaz nitrasyon işlemine tabi tutulmuş ve ardından 1175 °C'de hava ortamında 10 gün süreyle izotermal oksidasyon testine tabi tutulmuştur. Numunelerin oksidasyon işlemlerinin ardından, numunelerin ağırlık değişimleri analitik terazi ile ölçülmüş ve performans karakterizasyonu SEM-EDS, XRF ve XPS analizi ile birlikte mikrosertlik testleri ile gerçekleştirilmiştir. Bu bulguların amacı, HS 188 alaşımının yüksek sıcaklıkta operasyonel performansını artırmak ve böylece modern uçak motoru parçalarının tasarım ve geliştirilmesine yardımcı olmaktır. Ayrıca, çalışmanın Türkiye'nin yerel ve ulusal motorlarının bilgi birikimine katkı açısından gelişimine katkı sağlaması beklenmektedir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 7 March 2025
Received in revised form 12 May 2025
Accepted 26 May 2025
Available online 30 June 2025

Keywords:

HS 188® superalloy,
Gas nitriding
Isothermal oxidation)

DOI: 10.24012/dumf.1653368

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

HAYNES 188 (HS 188) alloy possess high temperature strength which enables excellent resistance against prolonged exposure in oxidative environments, such as that in aircraft or tank engine components, combustion chambers and rocket nozzle applications. This paper is focused on improving the oxidation resistance of HS 188 alloy by means of gas nitriding treatments in order to develop surface and subsurface metallurgy.

The enlisting of materials for the research was followed by assessment and metallography of the alloy. The samples were subjected to gas nitriding followed by isothermal air oxidation at 1175°C for 10 days. Subsequent to the oxidation process weight change in the samples was determined gravimetrically, while their performance was characterized by SEM-EDS, XRF, XPS and microhardness measurements. The results are aimed to enhance the high temperature properties of the HS 188 alloy towards the aim of contributing towards the design and development of modern aircraft engine parts. In addition, the study is expected to serve as an important source during the development of domestic and national engines of Turkey.

Giriş

Yanma odası ve art yakıcı gibi kritik motor bileşenleri, yüksek sıcaklıklara dayanıklılık ve oksidasyon direnci sağlayabilen malzemeler gerektirir. Bu bileşenlerin metal yüzeyleri genellikle 1000 °C'yi aşan sıcaklıklara maruz kalır. Bu nedenle, mekanik dayanımın yanı sıra oksidasyon ve korozyona karşı direnç büyük önem taşır. Bu koşullarda, nikel (Ni) ve kobalt (Co) bazlı süper alaşımlar öne çıkar. HS 188, üstün yüksek sıcaklık dayanımı, işlenebilirliği ve uzun süreli oksidasyon kararlılığı ile bu alaşımlar arasında dikkat çekmektedir [1-3].

Yanma odası astarları ve art yakıcıların yapımında genellikle Su-263, Hastelloy X, Haynes 230 ve Inconel 617 gibi süper alaşımlar kullanılır. Literatürde, bu alaşımlar arasında Haynes 188 (HS 188)'in 800 °C üzerinde sıcaklık dayanımı, oksidasyon kararlılığı ve kaynaklanabilirliği açısından diğerlerinden üstün olduğu belirtilmiştir [3,4]. Ayrıca, yanma odası bileşenlerinin tasarımında kullanılan diğer malzemeler arasında titanyum alaşımları ve IN 718 dövme malzemesi de yer almaktadır [5].

Gaz türbinlerinde kullanılan bu tür malzemelerin performansı yalnızca kimyasal kompozisyonlarına değil, aynı zamanda yüzey modifikasyonu ve koruyucu kaplama uygulamalarına da bağlıdır. Örneğin, termal bariyer kaplamaları (TBC) ve seramik karolar, bu malzemelerin termal dayanımını artırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır [6]. Talal ve Rahman'ın çalışması, TBC uygulamalarının yüksek sıcaklık ortamlarında mekanik dayanımı artırırken termal genleşme farklılıklarını azaltmada etkili olduğunu göstermiştir [6].

Son 50 yılda HS 188, Nimonic 86 ve Inconel 617 gibi modern süper alaşımlar geliştirilmiştir. Bu alaşımlar, yüksek sıcaklık koşullarında uzun süreli oksidasyon direncini koruyabilen Cr_2O_3 tabakası oluşturma kabiliyetiyle dikkat çeker [7]. Ancak, Cr_2O_3 tabakasının 1000 ^oC'nin üzerindeki sıcaklıklarda uçucu oksitlere dönüşmesi koruyucu etkisini sınırlar. Bu gibi durumlarda, alumina (Al_2O_3) tabakası oluşturan alaşımlar tercih edilir [8].

Nitrasyon, süper alaşımların aşınma direnci, sertlik ve yorulma dayanımını artıran bir yüzey modifikasyon tekniğidir. Bu süreçte, alaşım yüzeyine azot difüze edilerek nitrürlerin oluşumu sağlanır ve böylece mekanik özellikler önemli ölçüde iyileştirilir. Nikel ve kobalt bazlı süper alaşımlarda, gaz nitrasyonu, plazma nitrasyonu ve düşük sıcaklıkta nitrasyon gibi yöntemler umut verici sonuçlar göstermiştir. Özellikle plazma nitrasyonu, süreç parametreleri üzerinde hassas kontrol sağlayarak homojen ve kusursuz nitrür katmanlarının oluşmasını sağlar [9,10]. Bu katmanlar, döngüsel termal ve mekanik streslere dayanıklılığı artırarak malzemenin performansını önemli ölçüde iyileştirir [10].

Yapılan çalışmalar, nitrasyonun yüzey mikro yapısını iyileştirerek çatlak oluşumunu geciktirdiğini ve gerilim birikim noktalarını azalttığını göstermiştir [10]. Oksidasyon direnci, özellikle jet motorları ve endüstriyel gaz türbinleri gibi zorlu ortamlara maruz kalan süper alaşımlar için kritik bir özelliktir. Bu alaşımlar genellikle krom oksit (Cr_2O_3) veya alumina (Al_2O_3) gibi koruyucu oksit katmanları oluşturarak oksidasyona karşı bir bariyer oluşturur. Bu oksitlerin kararlılığı ve yapışma özellikleri, özellikle krom, aluminyum ve itriyum gibi alaşım elementlerinin varlığından etkilenir [11]. Ancak, 1000 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda krom oksit volatil hale gelebilir ve etkinliği azalabilir [11]. Bu durumlarda, uzun vadeli performans için alümina oluşturan süper alaşımlar tercih edilir [9,12].

Son yıllarda, alaşımlama ve yüzey işlemleri üzerine yapılan çalışmalar, nitrasyonun oksit katmanlarının stabilitesini artırarak ve bozulmalarını önleyerek oksidasyon direncini sinerjik bir şekilde geliştirdiğini göstermiştir [9,12]. Bu gelişmeler, yüksek sıcaklık uygulamalarında üstün performans için yüzey mühendisliği tekniklerinin alaşım tasarımıyla birleştirilmesinin önemini vurgulamaktadır [7]. Lu'nun çalışmasında, 816-982 °C arasında test edilen HS 188 alaşımında döngüsel yorulma sırasında çatlak ilerleme hızlarının maksimum gerilimde tutulma süresiyle doğru orantılı olarak arttığı belirtilmiştir [7]. Bu, HS 188 gibi süper alaşımların oksidasyon dayanımını artırmak için yalnızca kimyasal katkılara değil, aynı zamanda mekanik yükleme koşullarına da dikkat edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

HS 188 alaşımının oksidasyon ve termal dayanımını artırmak için yüzey modifikasyonu gereklidir. Plazma nitrasyon gibi yöntemler, oksidasyon sırasında mikro çatlak oluşumunu azaltırken yüzey tabakasının sürekliliğini artırır [10]. Ayrıca, düşük sıcaklıkta uzun süreli nitrasyon işlemleri de stres konsantrasyonlarını azaltmada etkili bir alternatif olarak öne çıkmaktadır [13]. Hick'in çalışmasında, 427-871 °C arasında izotermal maruziyet sırasında HS 188, Hastelloy X ve Inconel 617 alaşımlarının ikincil karbür çökelmesine maruz kaldığı ve bunun sonucunda sünekliğin azaldığı gözlemlenmiştir [3]. Özellikle, Hastelloy X'te J ve sigma (σ) fazları, HS 188'de ise Laves fazının oluşumu darbe dayanımı ve sünekliği olumsuz yönde etkilemiştir [3,14].

Nitrasyon sonrası oluşan mikro çatlakların önlenmesi için lantan katkısının etkisi geniş bir şekilde araştırılmıştır. Lantan, oksidasyon sırasında Cr_2O_3 tabakasının sürekliliğini artırarak koruyucu tabakanın çatlamasını önler. Buna ek olarak, nadir toprak elementleriyle zenginleştirilen yüzey tabakaları, yüksek sıcaklıklardaki stres konsantrasyonlarını dağıtarak çatlak oluşumunu geciktirir [6,15].

Yüksek sıcaklık alaşımlarında oksidasyon direnci, malzeme performansını belirleyen temel unsurlardan biridir. HS 188, yüksek sıcaklıklarda Cr_2O_3 tabakası oluşturarak oksidasyona karşı direnç sağlar. Ancak, 1000 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda bu tabaka uçucu oksitlere dönüşerek koruyucu etkisini kaybedebilir [8]. Pérez-González ve arkadaşları, Haynes 282 alaşımının 800-1000 °C arasında izotermal oksidasyona karşı direncini incelemiş ve Al_2O_3 tabakalarının sürekliliğinin oksidasyon direncini artırmada kritik olduğunu belirtmiştir [16].

Yıldız'ın çalışmasında, Cu-Al-Fe-Co alaşımının 600-900 °C arasında izotermal oksidasyon davranışları termogravimetrik analizlerle incelenmiştir. Bu çalışmada,

oksidasyon kinetiği ile kütle kazanç eğrilerinin uyumlu olduğu ve böylece yüksek sıcaklıkta malzeme kaybının etkili bir şekilde değerlendirilebildiği belirtilmiştir [17]. Bu gibi analizler, alaşımların uzun süreli performansını öngörmek için önemlidir.

Nitrasyon işlemi sırasında oluşan tabakanın altlık malzeme ile etkileşimi, malzemenin uzun süreli termal dayanımını doğrudan etkiler. Özellikle, nitrasyon sırasında azot iyonlarının malzeme altına difüzyonu mekanik özelliklerde zayıflamalara neden olabilir. Bu etkileşimi minimize etmek için tabaka sürekliliği ve kalınlığı optimize edilmelidir [15]. Ayrıca, plazma nitrasyon gibi yöntemler, bu tür etkileri sınırlandırmada etkili bir çözüm sunmaktadır [18].

Literatürde diğer süper alaşımların nitrasyon parametreleri ile ilgili çalışmalar bulunmakla beraber, HS 188 nitrasyonu üzerine yapılan araştırmalar sınırlıdır. Bu alandaki çalışmalar, yalnızca literatürdeki boşluğu doldurmakla kalmayıp aynı zamanda milli ve yerli uçak motoru geliştirme projelerine katkı sağlayacak referans bir araştırma oluşturmayı amaçlamaktadır. Nitrasyon sonucunda oksidasyon direncinin artırılması, bu alaşımın bir ölçüt olarak ele alınması ve aynı malzemenin sürünme davranışına ilişkin daha fazla araştırmaya ilham vermesi beklenmektedir.

Materyal ve Metot

Bu çalışmada, hurda malzemeden temin edilen 20 cm × 20 cm × 2 mm boyutlarındaki bir numune, 20 mm × 20 mm × 2 mm boyutlarında daha küçük parçalara kesilmiştir. Kontrol ve nitrasyon uygulanmış test numunesi, temel karakterizasyon çalışmaları için sıcak kalıplama yöntemiyle bakalit içerisine alınmıştır. Yüzey hazırlık işlemleri kapsamında, numuneler sırasıyla #600, #800, #1000 ve #1200 grit numaralı silisyum karbür zımparalarla zımparalanmış, ardından 3 µm ve 1 µm partikül boyutuna sahip elmas süspansiyonları ile parlatılmıştır. Parlatma işlemi sonrasında, numuneler etanol ve aseton kullanılarak temizlenmiş ve kurutulmuştur. Kimyasal bileşim analizi, Niton XL2 taşınabilir XRF cihazı ile gerçekleştirilmiş ve malzemenin HS 188 alaşımı olduğu doğrulanmıştır.

Ek numuneler, F24 boyutunda beyaz alümina partikülleri ile yüzey kumlama işlemine tabi tutulmuş, ardından etanol Şekil 1. HS 188 numunesine ait a) XRF analiz sonucu, ve b) pikleri.ile temizlenip aseton ile kurutularak kontaminasyondan arındırılmıştır. Gaz nitrasyon işlemi, Alpha Metalurji A.Ş. bünyesinde, %80 amonyak (NH_3) ve %20 azot (N_2) içeren kontrollü bir atmosferde, 500 °C sıcaklıkta ve 4 saat süreyle uygulanmıştır. Nitrasyon işlemi tamamlandıktan sonra, numuneler 1175 °C sıcaklıkta, ortam havasında, 24, 48, 60 ve 240 saat süreyle izotermal oksidasyona maruz bırakılmıştır.

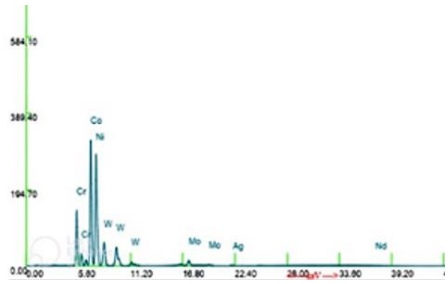
İşlem süreci boyunca numunelerin ağırlık değişimleri, beş ondalık hassasiyetle ölçüm yapabilen Precisa marka analitik terazi kullanılarak izlenmiştir. Oksidasyon sonrasında yüzey bileşimi Thermo Scientific K-Alpha XPS sistemi ile analiz edilirken, kimyasal kompozisyondaki değişimler Niton XL2 taşınabilir XRF cihazı ile değerlendirilmiştir. Kesitlerin mikroyapısal incelemeleri, Carl Zeiss 300VP SEM ve JEOL JCM 6000 Plus SEM/EDS cihazları ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, mikrosertlik analizleri 200 gram yük altında çalışan Emcotest Durascan G50 mikrosertlik cihazı kullanılarak yapılmıştır.

Bulgular ve İrdeleme

Numunelerin tedarik edildiği halindeki XRF analizleri Şekil 1'de verilmektedir.

Element	% Ağırlık	Sapma
Fe	1,840	0,061
Mn	0,828	0,070
Cr	20,566	0,136
Ni	23,583	0,172
Mo	0,485	0,020
Co	38,286	0,227
Zr	0,013	0,005
Nb	0,141	0,012
W	14,096	0,153
Re	0,161	0,076
Diğer	0,001	

(a)

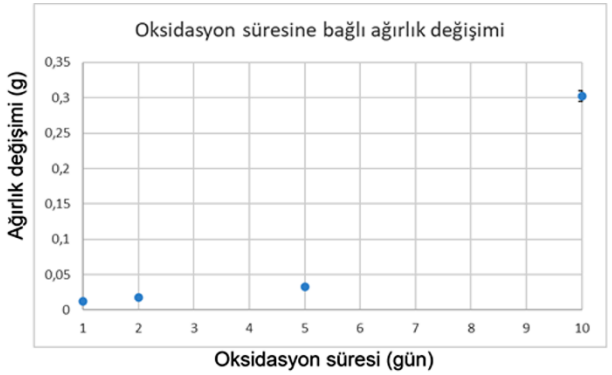


(b)

Şekil 1. HS 188 numunesine ait a) XRF analiz sonucu, ve b) pikleri.

İzotermal oksidasyon testi için 1, 2, 5. ve 10. günlerin sonunda numuneler fırından çıkarılıp ağırlıkları ölçülmüştür.

Oksidasyon işlemine bağlı olarak işlem sonrasında numunelerin ağırlık değişimleri Şekil 2 ve Tablo 1'de verilmiştir. Bu ağırlık artışı özellikle 5. Günden sonra oksidasyonun hızlandığını göstermektedir. Numuneler bir asıl ve iki şahit olarak çalışılmıştır, standart sapmalar çok düşük olduğundan sadece 10. Gündeki numunede belirgin halde görülmektedir.



Şekil 2. Farklı sürelerde oksidasyon işlemi sonrasında numunelerin ağırlık değişimi.

Tablo 1. Gaz nitrasyon uygulaması ve oksidasyon sonrası numunelerin ağırlık değişimi ve standart sapmaları

Gün	Ağırlık Değişimi (g)	Standart Sapması (±)
1	0,01223	0,00012
2	0,01727	0,00102
5	0,03323	0,00212
10	0,30231	0,00758

Ağırlık değişim sonuçları oksidasyon sonucu ağırlık değişiminin 5. günden sonra dramatik olarak arttığını ortaya koymuştur. Oksidasyon sonucu ağırlık artışının, koruyucu krom oksit tabakasının azalması ve nitrasyon sonrası yüzeydeki mikro çatlakların oluşumu, ayrıca oksidasyon neticesinde yüzeydeki elementler ile meydana gelen reaksiyon sonucunda oluşan oksitli bileşiklerle ile ilişkili olduğu görüşüne varılmıştır. Bu sonucu etkileyen sebepler XRF analizi ve yüzeyde yapılan XPS analizi sonuçları ile irdelenmektedir. Numunelerin 1. ve 10. günlerdeki Ni, Cr ve Co, elementlerini içeren XRF analiz sonuçları Tablo 2 ve 3'te verilmektedir. Bu elementler alaşımdaki temel elementler olduğu ve analizdeki değişimi sadeleştirmek bu şekilde temelde meydana gelen değişimi daha iyi göstermek üzere seçilmiştir. 10 günlük işlem süresinin ardından, toprak yöntemi (Soil mode) tercih edilmiştir çünkü bu yöntem, elementel değişimleri genellikle ppm seviyesinde gösterebilme avantajına sahiptir. Ancak XRF analizi sonuçlarına göre, yüzeyde oluşan kaplama tabakasındaki krom içeriğinde %90'dan fazla bir azalma gözlemlenmiştir. Bu durum, özellikle kromun yüksek oksidasyon direncine katkı sağlayan temel elementlerden biri olması nedeniyle önemli kabul edilmektedir. Nitrasyon tabakasının yüksek sıcaklıklarda çatlamasının sebebinin krom fakirleşmesi olduğu düşünülmektedir. Ayrıca numuneleri hassas bir şekilde keserken, hemen hemen tüm altlık metalinin (HS 188®) oksitlendiği ve kolayca kesildiği, tüm metalin korozyona uğradığı ortaya çıkmıştır. Bu da nitrasyon tabakasının daha yüksek sıcaklık ve sürelerde herhangi bir korumayı desteklemediğini göstermektedir. Nikel ve kobalt ise kroma kıyasla oksidasyona ve yüksek sıcaklık korozyonuna karşı daha fazla direnç göstermiştir. Bu durum Ellingham diyagramlarına ve elementlerin elektromotif kuvvet serilerine bakıldığı zaman da çıkarılacak bir sonuçtur [19,20].

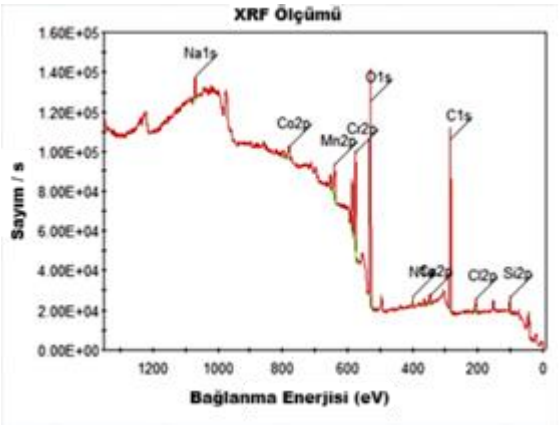
Tablo 2. 24 sa oksidasyon sonrası XRF sonucu

Genel Metal Modu			Toprak Modu		
Element	%ağırlık	sapma	Element	ppm	sapma
Cr	43,73	0,20	Cr	798,8 K	4,0M
Ni	16,44	0,17	Ni	84,1 K	0,6K
Co	23,56	0,22	Co	182,6K	1,3 K

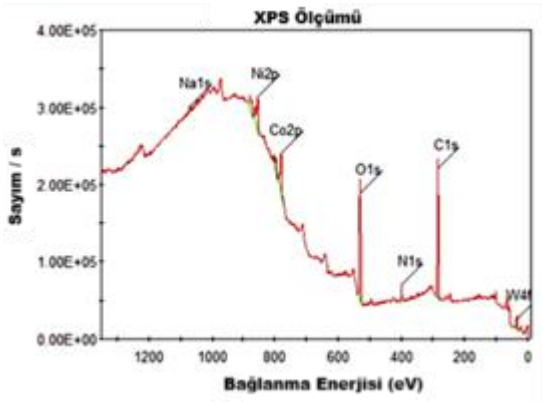
Tablo 3. 240 sa oksidasyon sonrası XRF sonucu

Genel Metal Modu			Toprak Modu		
Element	%ağırlık	sapma	Element	ppm	sapma
Cr	1,25	0,03	Cr	1 M	0M
Ni	50,35	0,19	Ni	759,9 K	2,2 K
Co	46,94	0,18	Co	60,1K	1,4 K

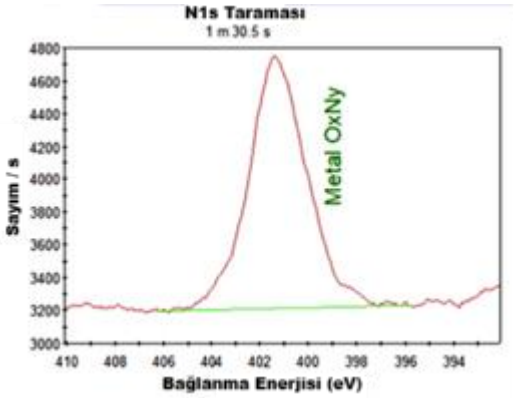
Bu analizlere ilaveten numunelerin yüzeyinden yapılan XPS analizinin sonuçları Şekil 3-5 arasında verilmiştir. 10. gün sonunda, numunelerin yüzeyinde oksit fazlarının oluştuğu ve tepe noktalarının yoğunluklarının 1. gün verilerine göre arttığını göstermektedir. Benzer şekilde, nitrasyon sonrasında oksitlenmiş numunelerin 1. ve 10. gün SEM analiz sonuçlarına bakarak (Şekil 6-7) oksitlenme süresi arttıkça oksit tabakanın kalınlığının arttığını söylenebilir. 24 saatin sonunda kaplama kalınlığı 16,36 µm iken, 240 saatin 41,27 µm olmuştur. Yüzeyde fakirleşen krom tabakasının yerini nikel ve kobalt oksit tabakaları almıştır. Bu durum ayrıca yüzeyden altlık metale doğru oksijenin difüzyonunu ortaya koymaktadır. Bu oksidasyon tabakasının parabolik olarak difüzyon kontrollü olarak büyüdüğü kabul edilerek; $x^2 = k.T$ formülünü kullanarak, x; oksidasyon tabakası kalınlığı (µm), k; parabolik hız sabiti (µm^2/sa), t; sa. Bu formülden yola çıkılarak k_1=11,15 µm^2/sa ve 7.10 µm2/sa ortalama olarak da 9.12 µm^2/sa olarak bulunmuştur, grafik Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 5'te (a) Bağlanma enerjisi yaklaşık 402 eV civarında gözlemlenen geniş tepe, yüzeyde Metal–OxNy yapılarının varlığını göstermektedir. Bu yapı genellikle metal-nitrür-oksit bileşiklerini işaret eder. (b) Yaklaşık 855–875 eV aralığında elde edilen spektrum, NiO ve nikkel elementel formu ile ilişkilendirilmiştir. Yüzeyde nikelin oksitlenmiş formda bulunduğunu göstermektedir. (c) O1s bölgesinde alınan spektrumda, 530–533 eV civarındaki tepe değerleri, hem metal oksitlerin hem de metal karbonat (Metal–CO_3) bileşiklerinin varlığını işaret etmektedir. (d) Co 2p bölgesine ait spektrumda, yaklaşık 780–800 eV aralığında üç ayrı oksit faz gözlemlenmiştir: Co_3O_4, Co_2O_3, ve CoO. Bu durum, kobaltın yüzeyde farklı oksidasyon basamaklarında bulunduğunu göstermektedir [21-27].



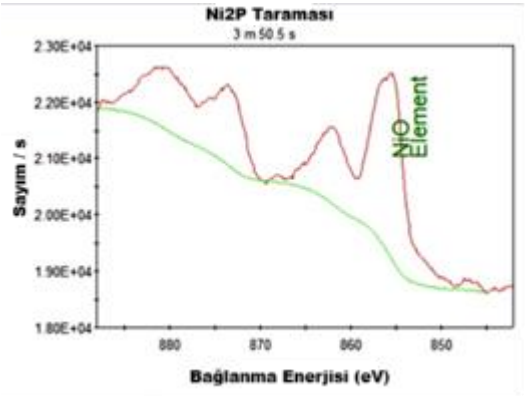
Şekil 3. Nitrasyon sonrası 24 sa oksidasyon sonrasında yüzeyinin XPS analiz neticesi.



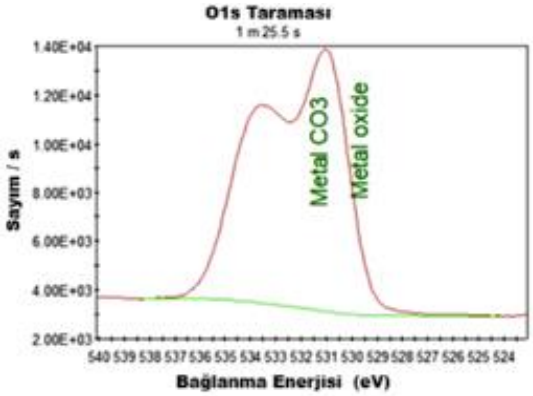
Şekil 4. Nitrasyon sonrası 240 sa oksidasyon sonrasında yüzeyinin XPS ölçümü.



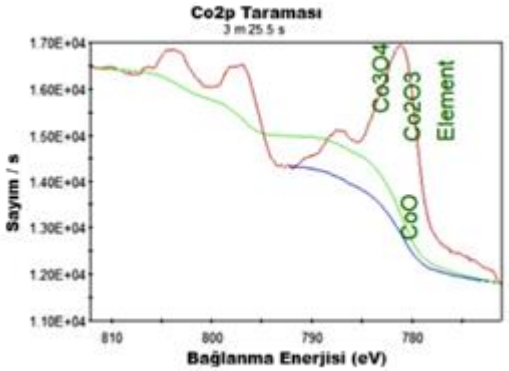
(a)



(b)

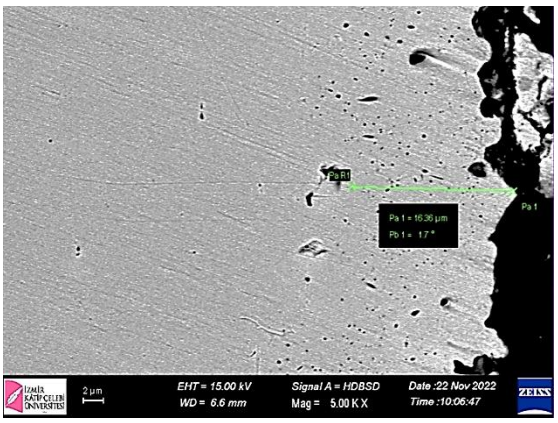


(c)

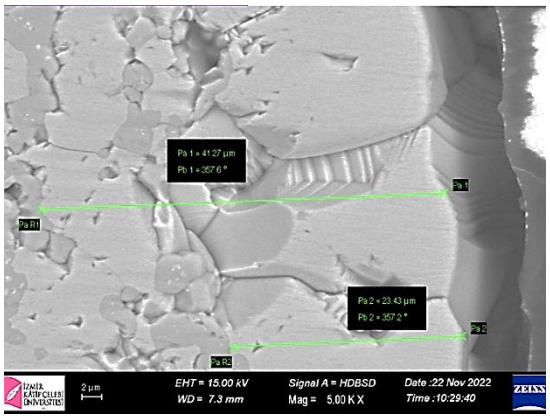


(d)

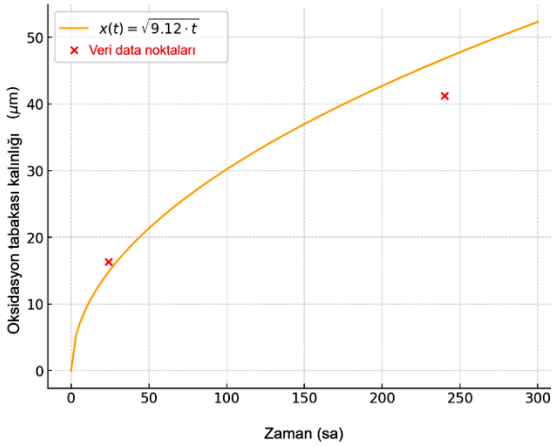
Şekil 5. Nitrasyon sonrası 240 sa oksidasyon sonrasında numunelerin yüzeyinde oluşan metal oksit fazları.



Şekil 6. Nitrasyon sonrası 24 sa oksidasyon sonrasında numunenin SEM mikro görüntüsü.

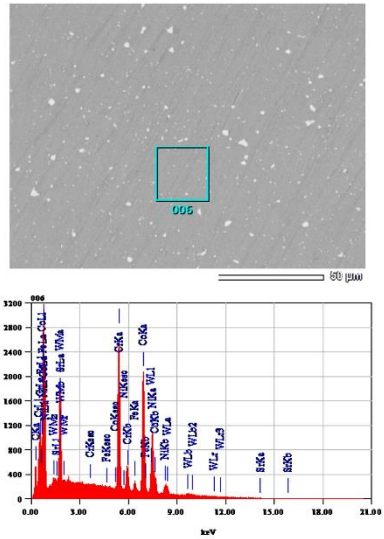


Şekil 7. Nitrasyon sonrası 240 sa oksidasyon sonrasında numunenin SEM mikro görüntüsü.



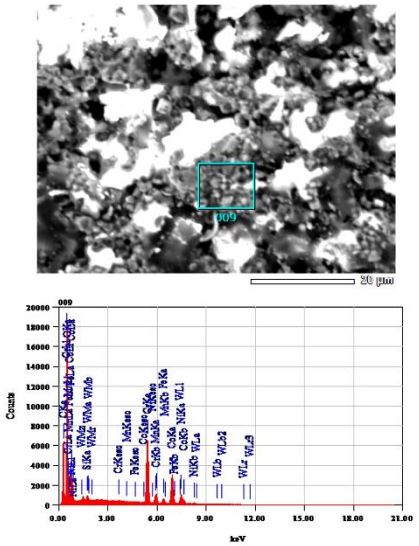
Şekil 8. Zamana göre oksidasyon tabakasının değişimi.

Şekil 9 ve 10'da yer alan SEM-EDS analizleri, nitrasyon işleminden sonra sırasıyla 24 ve 240 saatlik oksidasyon süreleri sonunda gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, kaplama altındaki malzeme boyunca oksijenin zamanla ana metale nüfuz ettiğini ve nitrasyon tabakasının oksidatif ortamda koruyuculuğunu kaybettiğini ortaya koymaktadır. Analiz sonuçlarında 240 saatin sonunda oksijenin yapıya hemen hemen bütünüyle difüzyonu sonucunda oksit fazların belirgin olarak EDS analizinde saptandığı görülmektedir, yapı hemen hemen bütünüyle oksitlenmiştir. Bu süreçte EDS analizinden yola çıkarak yapılan analizde, NiO, Co_2O_3 yapı (CoO ve Co_3O_4 şeklinde bozunabilir) ve CrO ve Cr_2O_3 şeklinde ana metalde korozyon ürünleri oluştuğu, yüzeyde yapılan XPS analizi ile bu verilerin uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.



Element	% Atom
Sr L	0,20
Fe K	1,89
C K	19,48
W M	4,02
Cr K	21,61
Co K	19,86
Ni K	32,94
	100,00

Şekil 9. Nitrasyon sonrası 24 sa oksidasyon sonrasında kesit alanında numunenin SEM mikro görüntüsü ve EDS analizi.



Element	% Atom
Si K	0,19
Mn K	0,17
W M	0,06
Fe K	1,09
Ni K	3,21
C K	37,74
Co K	7,92
Cr K	9,25
O K	40,38
	100,00

Şekil 10. Nitrasyon sonrası 240 sa oksidasyon sonrasında kesit alanında numunenin SEM mikro görüntüsü ve EDS analizi

Nitrasyon sonrasında 24 sa oksidasyon sonunda kaplamanın kesit alanı boyunca sertlik 308,4 ± 7,13 HV(0,2) olarak bulunmuştur. Nitrasyon sonrasında 240 sa oksidasyon sonunda kaplamanın kesit alanı boyunca sertlik 51,8 ± 2,17 $HV_{(0,2)}$ olarak bulunmuştur. Bu durum malzemede oksidasyon ile beraber bozunan malzemenin ve kaplamanın fiziksel özelliklerindeki zayıflamayı da ortaya koymaktadır.

Yüksek sıcaklık oksidasyonu sonrasında malzemelerde meydana gelen krom oksit (Cr_2O_3), nikel oksit (NiO) ve kobalt oksit (Co_3O4) oluşumu, malzemenin sertliği ve mukavemeti üzerinde önemli etkiler yaratır. Bu etkiler, oksitlerin yapısı, mekanik davranışları ve oksidasyon sürecinde meydana gelen kimyasal değişikliklerle doğrudan ilişkilidir.

Krom oksit (Cr_2O_3), genellikle koruyucu bir tabaka oluşturarak yüzeyi oksidasyona karşı dayanıklı hale getirir. Bu tabaka sert ve kompakt bir yapıya sahiptir, bu nedenle malzeme yüzey sertliği belirgin bir şekilde artar. Ancak, uzun süreli oksidasyon koşulları altında kromun oksit fazına difüze olması, malzeme yüzeyinde krom fakirleşmesine yol açar. Krom eksikliği, yüzey altının mukavemetini ve tokluğunu azaltabilir. Literatürde, paslanmaz çeliklerde krom fakirleşmesiyle yüzey sertliğinin düştüğünü ve mekanik zayıflama görüldüğünü vurgulanmıştır [28].

Nikel oksit (NiO), yüzeydeki krom oksitin koruyucu olmadığı alanlarda oluşur. Seramik yapıda olmasına rağmen , çoğunlukla gözenekli ve kırılgan bir tabakaya sahiptir. Literatürde bu tabakanın yüzey sertliğini bir miktar artırabileceğini ancak yapısal gözeneklerinin mekanik dayanıklığı azalttığını belirtmiştir. Özellikle, bu tip oksitler, oksidasyon dayanımına katkı sağlamaktan ziyade yüzey çatlamalarına neden olmaktadır [29].

Kobalt oksit (Co_3O_4), kobalt bazlı süper alaşımlarda yüzeyde oluşur ve genellikle yüksek sıcaklıkta kırılgan ve gözenekli bir tabaka şeklindedir. Literatürde, kobalt oksidin malzeme yüzeyine zayıf yapıştığını ve bu durumun oksit soyulmasına, yüzey altı çatlaklarına ve genel mukavemet kaybına yol açtığını raporlamıştır [30].

Sonuç olarak, krom oksit fakirleşmesi, malzeme sertliğini ve mukavemetini olumsuz etkileyerek yüzey koruma kapasitesini azaltır. Aynı zamanda yukarıda belirtilen diğer oksitler gözenekli ve kırılgan yapıları nedeniyle yüzey özelliklerine olumsuz katkıda bulunur. Bu etkilerin uzun vadeli yüksek sıcaklık uygulamalarında kontrol edilmesi, malzemenin performansı için kritik önem taşımaktadır.

Sonuçlar

Bu çalışma, savunma, havacılık ve uzay sanayisinde kullanılan HS 188 süper alaşımının, 550 °C'de gerçekleştirilen nitrasyon işlemini takiben gösterdiği izotermal oksidasyon davranışını araştırmaktadır.

Numuneler, gaz nitrasyon işlemlerinden sonra laboratuvar ortamında 1175 °C sıcaklıktaki hava ortamında 10 güne kadar oksidasyona maruz bırakılmış, ardından 5 haneli hassas kuyumcu terazisinde ağırlık ölçümleri yapılmış, yüzey bileşimi, mikroyapı, sertlik incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

Sonuçları aşağıda özetlenmektedir:

i. Ağırlık değişimi, esas olarak 1175°C'de koruyucu olması gereken altlık malzemesi HS 188'in oksidasyonu nedeniyle zaman geçtikçe önemli ölçüde artmıştır. Bununla birlikte, nitrasyon tabakasının, belirli bir noktaya kadar -1175°C'lik bir çalışma sıcaklığında yaklaşık 120 saat boyunca- koruyucu olduğu gözlenmiştir.

ii. Nitrasyon ve oksidasyon işlemleri öncesi ve sonrası yapılan yapısal analizler, oksidasyon sonrası nitrasyon tabakasında mikro çatlakların oluşabileceğini ve bu çatlaklar aracılığıyla oksijenin altlık malzemeye nüfuz ederek oksidasyonu başlattığını ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, düşük sıcaklıklarda oluşan nitrasyon tabakasının yüksek sıcaklıklı oksidasyon ortamlarında yeterli koruma sağlayamadığını açıkça göstermektedir.

iii. Soil modunda yapılan XRF ve XPS analizleri sonucunda, yüzeydeki kaplama tabakasındaki krom içeriğinin %90'dan fazla azaldığı belirlenmiştir. Krom, yüksek sıcaklıklardaki oksidasyon direncine büyük ölçüde katkı sağladığı için bu azalmanın, nitrasyon tabakasının yüksek sıcaklıklarda çatlaması sonucu oluşan krom fakirleşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca numuneler hassas biçimde kesilirken, neredeyse tüm altlık metali (HS 188)'nin oksitlenmiş olduğu ve bu nedenle kolayca kesilebildiği gözlemlenmiştir. 240 saatlik oksidasyon süresinin sonunda ise, neredeyse tüm metalin korozyona uğradığı belirlenmiştir. Bu bulgular, nitrasyon tabakasının uzun süreli ve yüksek sıcaklıklı oksidatif ortamda etkin bir koruma sağlayamadığını açıkça ortaya koymaktadır.

iv. XPS analizleri, 10. gün sonunda numune yüzeyinde çeşitli oksit fazlarının oluştuğunu ve bu fazlara ait tepe noktalarının yoğunluklarının 1. gün verilerine kıyasla arttığını göstermektedir. Benzer şekilde, nitrasyon sonrasında oksitlenmiş numunelere ait 1. ve 10. gün SEM görüntüleri incelendiğinde, oksidasyon süresi arttıkça yüzeydeki oksit tabakasının kalınlaştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, 24 ve 240 saatlik oksidasyon süreleri sonunda yapılan SEM-EDS analizleri, oksijenin kaplama altındaki malzeme yapısına nüfuz ettiğini ve nitrasyon tabakasının koruyucu etkisinin zamanla azaldığını ortaya koymaktadır. Nitrasyon sonrasında 24 sa oksidasyon sonunda kaplamanın kesit alanı boyunca sertlik 308,4 ± 7,13 HV(0,2) olarak bulunmuştur, Nitrasyon sonrasında 240 sa oksidasyon sonunda kaplamanın kesit alanı boyunca sertlik 51,8 ± 2,17 HV(0,2) olarak bulunmuştur. Bu durum malzemede oksidasyon ile beraber bozunan malzemenin ve kaplamanın fiziksel özelliklerindeki zayıflamayı da ortaya koymaktadır.

v. Bu şartlar altında 550 ºC'de gerçekleştirilen nitrasyon işleminin, HS 188 alaşımının yüksek sıcaklık dayanımına katkısının sınırlı kaldığı çıkarımı yapılmıştır.

vi. Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular, 550 °C'de gerçekleştirilen nitrasyon işleminin HS 188 süper alaşımı üzerinde başlangıçta belirli bir oksidasyon direnci sağladığını, ancak uzun süreli ve yüksek sıcaklıklı (1175 °C) oksidatif ortam koşullarında bu koruyuculuğun büyük ölçüde azaldığını göstermiştir. Nitrasyon tabakasında zamanla meydana gelen mikro çatlaklar ve krom fakirleşmesi, koruyucu bariyerin zayıflamasına neden olmuş ve altlık malzemenin ilerleyen süreçte tamamen oksitlenmesiyle sonuçlanmıştır. Bu durum göz önünde bulundurularak, nitrasyon sonrası yüzeye aluminizasyon, silikon difüzyonu veya başka bir oksidasyona dayanıklı kaplama uygulanması, tabakanın yüksek sıcaklık dayanımını artırmak için potansiyel bir çözüm olarak önerilmektedir. Böyle birçok aşamalı yüzey modifikasyonu, özellikle havacılık ve uzay uygulamaları gibi aşırı sıcaklık ortamlarında daha uzun ömürlü yüzey stabilitesi sağlayabilir [31-36].

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK BİDEB 2209 A - Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı tarafından desteklenmiştir." Prof. Dr. Serdar Aktaş projenin TÜBİTAK projesi danışmanlığını yapmıştır, verdiği destek için kendisine derin sevgi ve hürmetlerimizi sunmaktayız. Isıl işlem ve yüzey işlemleri konusunda danışmanlık aldığımız ve nitrasyon işlemini gerçekleştirdiğimiz sektörün önde gelen kuruluşu Alfa Metalurji'ye, SEM-EDS ve mikrosertlik analizlerimizde desteklerini esirgemeyen Tri Mühendislik A.Ş ve AR-GE Müh. Hilal Çolak'a, analizlerin bir çoğunun yapıldığı Katip Çelebi Üniversitesi Merkez Laboratuvarı çalışanlarına, Marmara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nden Prof. Dr. Cevat Sarıoğlu'na oksidasyon çalışmaları için destekleri için, aynı bölümden Metalografi Laboratuvarı'nda Tekniker Semih Güven'e yardımları ve destekleri için şükranlarımızı sunarız.

Etik Standartlar Beyanı

"Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir."

Çıkar Çatışması

"Yazarlar, bu makalede bildirilen çalışmayı etkilemiş gibi görünebilecek, bilinen rakip mali çıkarları veya kişisel ilişkileri olmadığını beyan ederler."

Yazar Katkı Beyanı

Merve Kevkir: Metodoloji (Fikrin oluşması), tasarımın yapılması, makalenin kontrol edilmesi sorumludur. Nesrin Kelebek: Veri düzenlemesi, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, makalenin kontrol edilmesi sorumludur. Özge Saltan: Gerekli literatür taraması ve sonuçların değerlendirilmesi sorumludur. Burcu Nilgün Çetiner: Proje fikrinin geliştirilmesi, bilimsel sonuçların değerlendirilmesi ve çalışmaların yazım ve yayınlanma aşamasındaki prosedürlerden sorumludur.

Kaynakça

[1] S. Biswas, S. Ramachandra, P. Hans, and S. P. Suresh Kumar, "Materials for gas turbine engines: Present status, future trends and indigenous efforts," J. Indian Inst. Sci., vol. 102, no. 1, pp. 297-309, 2022.

[2] E. Stefan, B. Talic, Y. Larring, A. Gruber, and T. A. Peters, "Materials challenges in hydrogen-fuelled gas turbines," Int. Mater. Rev., vol. 67, no. 5, pp. 461-486, 2022, doi: 10.1080/09506608.2021.1981706.

[3] B. Hicks, "High-temperature sheet materials for gas turbine applications," Mater. Sci. Technol., vol. 3, pp. 772-781, 1987.

[4] Committee on Air Force and Department of Defense Aerospace Propulsion Needs Air Force Studies Board, Aerospace Propulsion Needs. Washington, DC, USA: National Academies Press, 2006.

[5] G. Solomon and Y. AlemayehuAdde (Kibret), "Design and analysis of rocket nozzle," IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN), vol. 10, no. 5, doi: 10.1016/j.matpr.2020.10.370.

[6] A. Q. Talal and K. F. Rahman, "Design and analysis of a gas turbine blade," Int. Res. J. Eng. Technol., pp. 479-486, 2020.

[7] Y. Lu, "High-temperature low-cycle-fatigue and crack-growth behaviors of superalloy," Ph.D. dissertation, Univ. of Tennessee, Knoxville, TN, USA, 2005.

[8] G. Y. Lai, "High-temperature corrosion: Issues in alloy selection," JOM, vol. 43, pp. 54-60, 1991, doi: 10.1007/BF03222722.

[9] O. Palma Calabokis, Y. E. Nuñez de la Rosa, V. Ballesteros-Ballesteros, and E. A. Gil González, "Nitriding treatments in nickel-chromium-based superalloy INCONEL 718: A review," Coatings, vol. 14, p. 993, 2024, doi:10.3390/coatings14080993.

[10] E. Almeida, C. Costa, and J. Milan, "Study of the nitrided layer obtained by different nitriding methods," Matéria, vol. 20, pp. 460-465, 2015, doi: 10.1590/S1517-707620150002.0046.

[11] P. Ren, S. Zhu, and F. Wang, "Isothermal oxidation behavior and microstructure change of a gradient low-expansion coating for superalloys," Corrosion Science, vol. 144, pp. 275-285, 2018, doi: 10.1016/j.corsci.2018.11.004.

[12] X. Duan, H. Xu, E. Wang, C. Guo, Z. Fang, T. Yang, Y. Zhao, and X. Hou, "Design of novel Ni-based superalloys with better oxidation resistance with the aid of machine learning," J. Mater. Sci., vol. 58, pp. 1-15, 2023, doi: 10.1007/s10853-023-08712-z.

[13] A. S. Biró, "Trends of nitriding processes," Prod. Process. Syst., vol. 6, no. 1, pp. 57-66, 2013.

[14] L. M. Pike and S. K. Srivastava, "Oxidation behavior of wrought gamma-prime strengthened alloys," Mater. Sci. Forum, vol. 595-598, pp. 661-671, 2008.

[15] S. V. Ovsepyan et al., "Growth kinetics of nitrides in Ni-Co-Cr-W-Ti alloys," Inorg. Mater. Appl. Res., vol. 6, no. 1, pp. 11-15, 2015.

[16] F. A. Pérez-González et al., "High temperature oxidation of Haynes 282," Oxid. Met., vol. 82, pp. 145-161, 2014.

[17] K. Yıldız, "High-temperature Cu-Al-Fe-Co alloy oxidation studies," Sci. Eng. J. Fırat Univ., vol. 28, no. 2, pp. 201-206, 2016.

[18] L. C. Casteletti et al., "Effect of plasma nitriding on wear and corrosion properties of hastelloy CW2M super-alloy" 65th ABM International Congress, 18th IFHTSE Congress and 1st

TMS/ABM International Materials Congress 2010, v. 5, p. 4391-4398.

[19] L. Veleva, "Soils and corrosion," in Corrosion Tests and Standards: Application and Interpretation, 2nd ed., R. Baboian, Ed. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2005, ch. 32, pp. 387-404.

[20] D. R. Gaskell and D. E. Laughlin, Introduction to the Thermodynamics of Materials, 6th ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2018, p. 436.

[21] B. D. Ratner and D. G. Castner, "Surface modification of materials," in Biomaterials Science: An Introduction to Materials in Medicine, 2nd ed., B. D. Ratner et al., Eds. San Diego, CA, USA: Elsevier, 2004, ch. 13, pp. 405–416.

[22] D. Briggs and J. T. Grant, Surface Analysis by Auger and X-ray Photoelectron Spectroscopy, IM Publications, 2003.

[23] J. F. Moulder, W. F. Stickle, P. E. Sobol, and K. D. Bomben, Handbook of X-ray Photoelectron Spectroscopy, Eden Prairie, MN, USA: Physical Electronics, 1995.

[24] A. Grosvenor, B. Kobe, M. Biesinger, and N. McIntyre, "Investigation of multiplet splitting of Fe 2p XPS spectra and bonding in iron compounds," Surf. Interface Anal., vol. 36, no. 12, pp. 1564–1574, 2004, doi: 10.1002/sia.1984.

[25] M. Biesinger, L. Lau, A. Gerson, and R. St. C. Smart, "Resolving surface chemical states in XPS analysis of first row transition metals, oxides and hydroxides: Sc, Ti, V, Cu and Zn," Appl. Surf. Sci., vol. 257, no. 3, pp. 887–898, 2010, doi: 10.1016/j.apsusc.2010.07.086.

[26] M. Biesinger, "Advanced analysis of copper X-ray photoelectron spectra," Surf. Interface Anal., vol. 49, no. 13, pp. 1325–1334, 2017, doi: 10.1002/sia.6239.

[27] K. Yamaguchi et al., "XPS study of Co-based oxides prepared by electrodeposition," J. Electrochem. Soc., vol. 144, no. 1, pp. 243–250, 1997.

[28] H. E. Evans, "Oxidation of metals and alloys," Annu. Rev. Mater. Sci., vol. 23, no. 1, pp. 1-17, 1993.

[29] I. G. Wright, "Effects of high-temperature oxidation on material performance," Surf. Coat. Technol., vol. 201, no. 6, pp. 2104-2110, 2006.

[30] B. A. Pint, P. F. Tortorelli, and I. G. Wright, "The effect of oxidation on mechanical properties of structural alloys," Metall. Mater. Trans. A, vol. 32, no. 8, pp. 1883-1891, 2001.

[31] T. S. Sudarshan and V. S. Vasantha, Surface engineering for corrosion and wear resistance, ASM International, 2011.

[32] L. Pawlowski, The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2008.

[33] H. Dong, Surface engineering of light alloys: Aluminium, magnesium and titanium alloys, Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2010.

[34] J. W. Lee, J. H. Lee, and S. H. Hong, "Improvement of oxidation resistance of austenitic stainless steels by aluminide coating," Surf. Coat. Technol., vol. 146–147, pp. 318–323, 2001, doi: 10.1016/S0257-8972(01)01350-3.

[35] Y. Wang, Z. Zeng, and L. Zhao, "Oxidation behavior of nitrided layers formed on Co-based superalloy," J. Alloys Compd., vol. 643, pp. 70–76, 2015, doi: 10.1016/j.jallcom.2015.04.029.

[36] S. S. Chatha, T. S. Sidhu, and B. S. Sidhu, "Performance of aluminized and chromized coatings on Ni- and Fe-based alloys at high temperatures: A review," J. Mater. Eng. Perform., vol. 19, no. 5, pp. 713–721, 2010, doi: 10.1007/s11665-009-9520-x.

Dicle University
Journal of Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/dumf
duje.dicle.edu.tr

Research Article

Investigation of Burr Formation and Circularity Error in Drilling of PLA Produced at Different Printing Temperatures with Machine Learning-Based Prediction

Ender EMİR[1*]

[1] Kahramanmaraş İstiklal University, Elbistan Vocational School, Automotive Technology Department, ender.emir@istiklal.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-4972-5064

ARTICLE INFO

Article history:

Received 13 March 2025
Received in revised form 28 April 2025
Accepted 7 May 2025
Available online 30 June 2025

Keywords:

Additive manufacturing, PLA, Printing temperature, Burr formation, Circularity, Machine learning

DOI: 10.24012/dumf.1656898

* Corresponding author

ABSTRACT

In this study, it was aimed to investigate the effect of feed (0.1-0.15-0.2 mm/rev) and printing temperature (190-210-230°C) on the formation of burrs and circularity in the drilling of samples produced using polylactic acid (PLA) material with the fused deposition modelling (FDM) technique, which is an additive manufacturing (AM) method. In the results obtained, it was observed that the burr height increased with the increase of the feed in the drilling of the samples, and the burr height decreased with the increase of the printing temperature. The maximum burr height at the hole entrance was 0.32 mm (0.2 mm/rev, 190°C), while the maximum burr height at the hole exit was 0.37 mm (0.2 mm/rev, 190°C). The maximum circularity deviation at the hole entrance was 0.15 mm (0.2 mm/rev, 230°C) and the maximum circularity deviation at the hole exit was 0.1 mm (0.2 mm/rev, 190°C). In addition, prediction modelling for burr height and deviation from circularity was performed with an average success rate of R^2 94%.

Introduction

Additive manufacturing (AM) is an innovative manufacturing technology in which 3D models are built layer by layer [1,2] This technology enables the production of complex geometries and functional parts [3], [4]. Due to the flexible production processes it offers compared to traditional production methods, its use in various fields such as agriculture, biomedical, aerospace, automotive, defence industry is becoming widespread [1,5,6]. In AM technology, the FDM technique is the most popular in the production of polymer-based materials due to its low cost, minimum waste and ease of material replacement [1,3,7]. However this method is a complex process that involves many production parameters such as layer thickness, raster angle, fill density, print speed, fill pattern, raster width, build orientation, etc. [2,8]. Consequently, researchers have concentrated on the alterations in the mechanical characteristics of the final product resulting from varying manufacturing settings. The printing temperature is particularly significant among these characteristics. The literature has examined the impact of printing temperature on mechanical characteristics. Vo et al. (2019) investigated the effects of 3D printing temperature on the mechanical properties of polypropylene [9]. Martinez et al. (2023) reported the effects of machining parameters on the mechanical properties of 3D printed polyhydroxyalkanoate parts [10]. Ulkir et al. (2024) investigated the effects of printing temperature on mechanical properties in the production of Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) material by additive manufacturing [11]. Lopez et al. (2024) reported the effects of nozzle temperature on mechanical properties in FDM technique [12]. Melo et al. (2024) included the effects of filament extrusion temperature on the mechanical properties of poly (butylene adipate-co-terephthalate) / poly (lactic acid) [13].

Conversely, subsequent to its fabrication via additive manufacturing, other processing steps are applied. These processes like as drilling and milling are necessary in the final assembly stages based on their specific applications. However, issues arise in the hole drilling process contingent upon the machining settings and the substance of the workpiece. One of these problems is the formation of burrs. The burr is a criteria for assessing the machinability of a material, resulting from plastic deformation along the edge of the workpiece during manufacturing operations [14,15]. In drilling, burrs are formed on both the entrance and exit side of the workpiece. Entrance burrs are formed by plastic flow, while exit burrs are formed by elongation of the material on the exit side of the workpiece [14]. Especially

in the processing of polymer-based materials, comprehending the correlation between cutting parameters and surface deformation is challenging due to varying viscoelastic behavior [15]. Studies have been carried out in the literature on the burr formation that may occur when polymer-based materials are subjected to different cutting conditions; however, studies are limited. Sundaram et al (2014) concluded that feed has the highest effect on the formation of exit burrs [16]. Kadivar et al. (2012) reported that the burr height increases with both speed and feed in drilling with a conventional drill [17]. Saravanakumar et al. (2015) found that burr height is affected by both feed and drill diameter [18]. Thakre et al. (2016) found that an increase in feed by 100% increased the burr height by approximately 25-50% [19]. Paramanik and Basak (2024) investigated that feed has a strong effect on burr height and chip thickness at the exit of the workpiece [20]. Emir et al. (2024) investigated the burr formation in the drilling of PLA samples with different lattice structures and stated that the lattice structure is an effective parameter in burr formation [21].

When the literature studies are examined, the studies on the burr formation in hole drilling of FDM production parameters are insufficient. In this study, unlike the existing studies, it is aimed to investigate the burr formation and deviation from circularity in the drilling process of PLA samples produced by FDM technique at printing temperatures. For this reason, the samples produced at different printing temperatures were subjected to drilling operations at three different feeds. For each hole, microscope images were taken at both entrance and exit regions and the burr heights and deviation from circularity were measured. In addition, a prediction model was developed by machine learning method using the original measured values.

Material and Method

Fabrication of drilling specimen

Drilling test specimens were produced using FDM technique with Creality Ender V3 SE model 3D printer (Fig. 1a). The device has a print volume of 220 x 220 x 230 mm, a filament diameter of 1.75 mm, a layer thickness of at least 20 microns and a maximum print speed of 24 mm^3/sec. Nine specimens were fabricated at three distinct printing temperatures (190°C, 210°C, and 230°C) with a constant scan angle of 0° to examine burr creation and deviations from circularity during the drilling process (Fig. 1b).

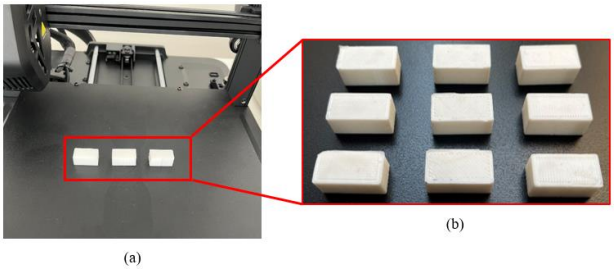


Figure 1. a) Production of test specimens, b) drilling test sample

Drilling test

Drilling operations were carried out on a Chevalier QP2040-L CNC vertical machining machine. The experiments were carried out under dry machining conditions using a Φ5 mm diameter HSS cutting tool produced at different printing temperatures and at different feeds given in Table. 1. For the precision of the experimental results, a different HSS drill was used for each hole due to the chip plastering and chip entanglement problems encountered in PLA drilling. Fig. 2 shows the hole images after drilling process.

Table 1. Drilling test parameters.

Feed (mm/rev)	Printing temperature (°C)	Spindle (rpm)
0.1 - 0.15 - 0.2	190 - 210 - 230	1500

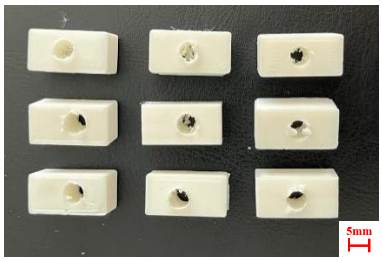


Figure 2. Drilling test.

Burr height and circularity error measurement

For each hole, measurements were taken from both the hole entrance and the hole exit. In addition, for the accuracy of the imaging, the average was calculated over the profile images of the part from four directions (Fig. 3). The burr height was measured with a Euromax brand streo microscope. Burr height was calculated as given in Equation (1) by subtracting the average value (h_2) from the nominal value (h_1). The deviation from circularity during drilling was measured at all hole entrances and exits. For measurement accuracy, each hole was divided into eight equal parts and the hole diameter values were determined. The equations given in Equation (2) and Equation (3) were used to calculate the deviation values.

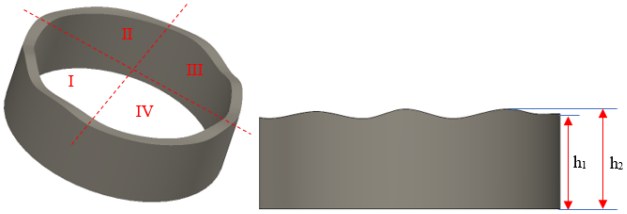


Figure 3. Burr height measurement zones.

$$\text{Burr height} = h_2 - h_1 \quad (1)$$

$$\text{Average dim.} = \frac{\sum Hole\ diameter}{Number\ of\ measurements} \quad (2)$$

$$\text{Deviation value} = |\text{Nom. dim-Avr. dim.}| \quad (3)$$

Machine learning

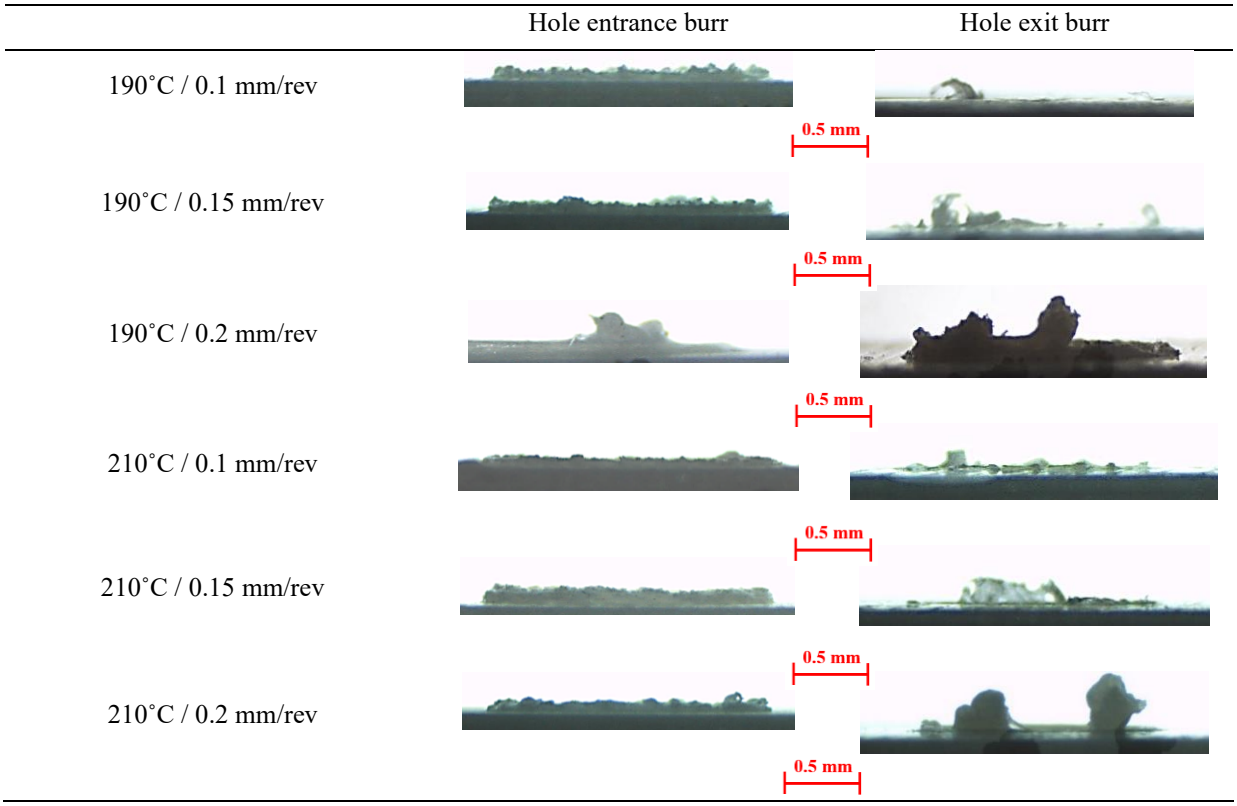
The study employed a machine learning approach to produce predictions based on the original data acquired from the experiments. The research favored this approach due to its efficacy in concurrently evaluating quantitative and qualitative data sets. This strategy is effective and readily adaptable for multivariate prediction models, particularly in natural nonlinear modeling tools. By concentrating on the paramount factors and disregarding the less significant ones, the approach diminishes the size of the forecasting dataset while enhancing both forecasting efficacy and velocity. The model was utilized to forecast the target variable. The anticipated value, error rate, and model performance (R^2) values were acquired.

Results and Discussion

Effect of feed on burr formation

Fig. 4 shows the burr images generated at the entrance and exit of the hole due to drilling PLA samples produced at various printing temperatures and feed. In the images obtained, it was observed that the burr formation at the hole entrance increased with the increase in feed and decreased with the increase in printing temperature. At high feeds, the cutting tool pushes the material instead of cutting it, making it difficult to cut at an adequate rate [22,23]. Consequently, insufficient chip removal arises from suboptimal cutting conditions on the PLA sample, leading to an increased production of burrs. In addition, with the increase in feed, the temperature increase due to the increase in friction is effective in the formation of burrs at the hole entrance. Melting occurs especially in drilling operations due to the low melting temperatures of polymer-based materials and therefore being sensitive to temperature. The microscope pictures captured at the entrance of the hole, as seen in Fig. 5a, were obtained subsequent to the drilling operations. A certain degree of melting buildup and burr creation at the hole's edge was proven to occur, contingent upon the feed following the initial contact of the cutting tool with the material. As a result of melting, the cutting tool could not cut in the desired way, resulting in an increase in burr formation.

When the burr formation at the exit of the hole was examined, a more pronounced formation was observed compared to the hole entrance. Fig. 5b shows the microscope images taken from the holes produced at 230°C printing temperature and drilled at different feed. In the images, the effect of feed on the burrs occurring at the exit of the hole is more evident. In the cutting process, the material weakens as it approaches the end of the drilling depth due to the increase in feed. Due to the rapid pushing of the material, it was observed that the material was torn or broken at the exit edges before the cutting process was completed (Fig. 5b). This resulted in larger and irregular burrs at the exit of the hole than at the entrance of the hole. In addition, a higher feed will increase plastic deformation due to the increased thrust force [16]. As a result, the optimum cutting process was obtained at a lower feed.



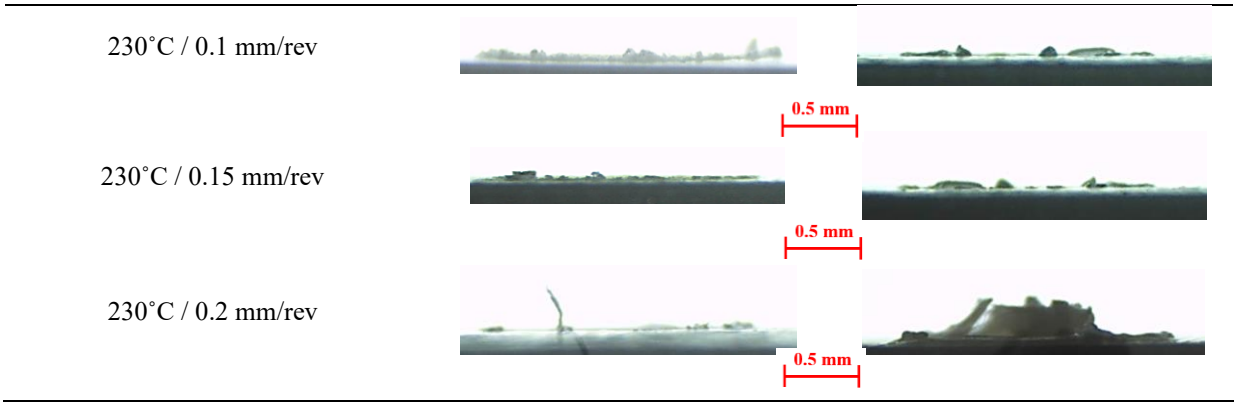


Figure 4. Burr images taken from the hole entrance and exit after drilling.

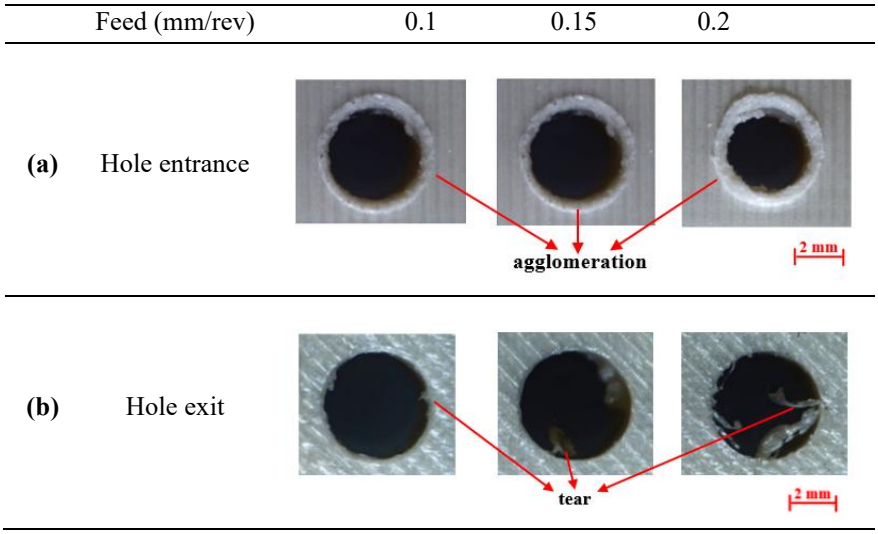


Figure 5. Produced at 230°C printing temperature a) hole entrance, b) hole exit images of PLA samples.

Effect of printing temperature on burr formation

With the increase in printing temperature, burr formation decreased. Especially with the increase in printing temperature, the viscosity of PLA decreases and provides a more stable layer bonding during printing compared to low printing temperatures [13,24]. If the printing temperature is low, it causes poor bonding properties in the previous laid layer and between the layers arranged side by side and loss of internal structure [24-27]. For this reason, the polymer material produced at low printing temperature (190°C) has a harder and fragile structure and causes burrs to remain on unevenly cut parts during drilling. At 0.1 mm/rev feed, microscope images taken from the hole entrance and exit of the samples produced at different printing temperatures are given in Fig. 6. It was noted that when the printing temperature increased, irregular forms such as melting aggregation at the hole entry and cutting at the hole exit happened less frequently. Consequently, elevated temperatures provide superior adhesion between layers, resulting in a more efficient drilling operation with fewer burrs compared to lower printing temperatures.

Effect of production and machining parameters on burr height

Fig. 7a and Fig. 7b shows the results of burr height measurements taken from PLA samples produced at different printing temperatures and drilled at different feed. The results showed that the burr height increased with the increase in feed and decreased with the increase in printing temperature. The increase in feed increases the cutting force for both hole entry and hole exit [22,28]. The sudden increase in temperature, along with the increased force at the hole entrance, resulted in the melting of PLA and the formation of deposits in the form of agglomeration near the hole's borders (Fig. 5a, Fig. 6a). In the drill exit area along the hole line, it was noted that interlayer adhesion, influenced by the printing temperature and the volume of material removed, resulted in tears at the hole exit and the formation of burrs (Fig. 5b, Fig. 6b). The maximum burr height measured for hole entrance was 0.32 mm at 0.2 mm/rev feed and 190°C printing temperature, while the minimum burr height was 0.168 mm at 0.1 mm/rev feed and 230°C printing temperature. The maximum burr height at the hole exit was 0.377 mm at a feed of 0.2 mm/rev and a printing temperature of 190°C, while the minimum burr

height was 0.285 mm at a feed of 0.1 mm/rev and a printing temperature of 230°C.

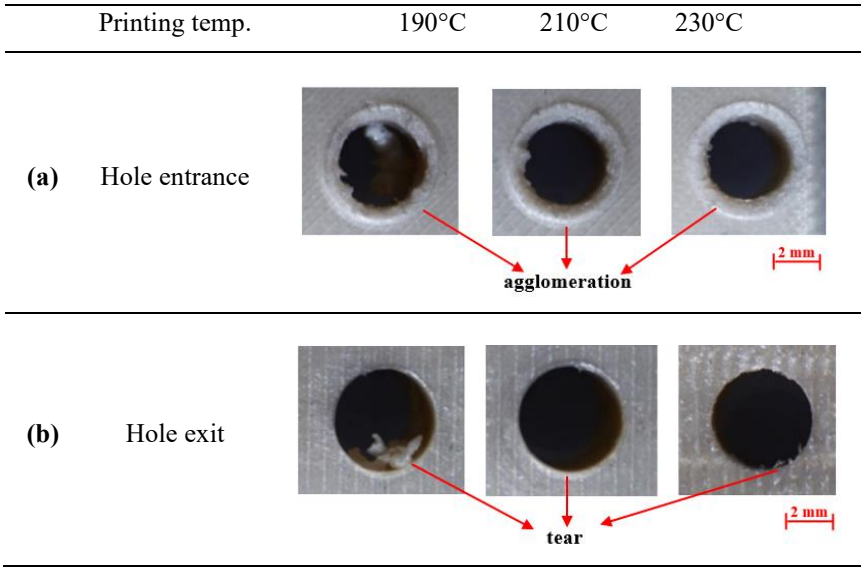
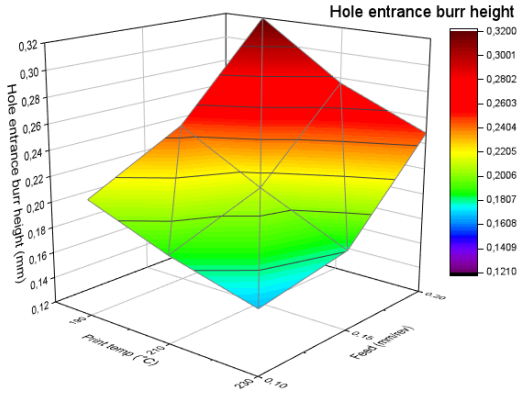
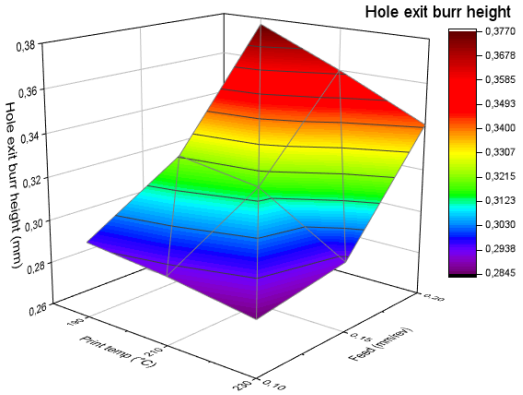


Figure 6. Produced at 0.1 mm/rev feed a) hole entrance, b) hole exit images of PLA samples.



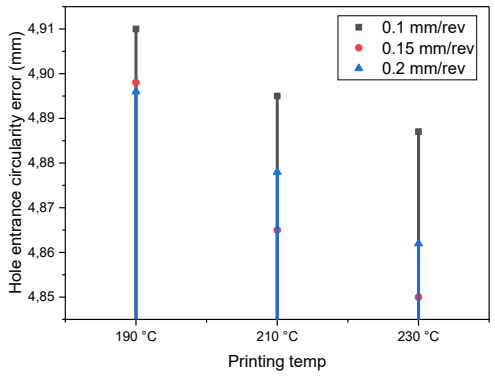
(a)



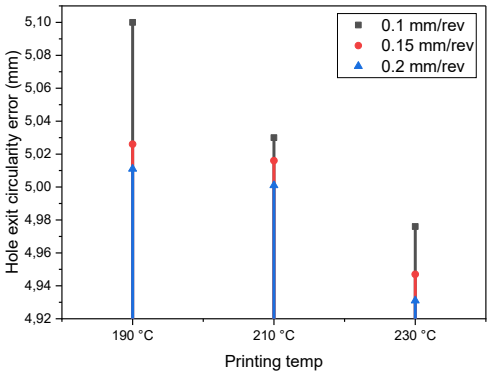
(b)

Figure 7. Burr height measurement results; a) hole entrance, b) hole exit.

Fig. 8a and Fig. 8b shows the results of the circularity measurements taken from both entrance and exit regions for each hole. It is seen that the deviation from the circularity at the entrance and exit of the hole increases with the increase in feed. The increase in feed prevents the chip removability from being at the desired level. This situation prevents the increase in the chips to be removed per unit time and the cutting tool from removing homogeneous chips by making an irregular feed [21]. On the other hand, it is seen that the amount of deviation from circularity decreases with increasing printing temperature. Increased interlayer bonding and lower brittleness with higher stamping temperature provide a more stable cutting environment during chip removal. Thus, since the cutting zone becomes more regular, the cutting tool pierces close to the desired shape instead of pushing the material. In the regularized cutting zone, the cutting tool performs the cutting process with less force during chip removal.



(a)



(b)

Figure 8. Circularity deviation measurement results; a) hole entrance, b) hole exit.

Machine learning results

Machine learning prediction results of burr height and circularity values are given in Table. 2 and Table. 3. R^2 values were calculated as 94% (6% error rate) on average in the experiments performed for the prediction results. In the results obtained, both the experimentally calculated values and the machine learning prediction model gave results proportional to each other.

Fig. 9 and Fig. 10 show the deviations of the burr height and circularity predicted using the machine learning method from the values obtained from the experimental study. It was seen that the deviation amounts were consistent between the values obtained from both the hole entrance and the hole exit and the values predicted by machine learning. While a maximum deviation of 8% was calculated for the burr height at the hole entrance (Fig. 9a), a maximum deviation of 6.78% was calculated at the hole exit (Fig. 9b). In the circularity measurement, a maximum deviation of 0.37% was calculated between the experimental data and the prediction data in the hole entrance diameter (Fig. 10a), while it was calculated as 1.54% at the hole exit (Fig. 10b).

Table 2. Machine learning burr height prediction results.

No	Feed	Printing temp	Hole burr height (mm)			
	(mm/rev)	(°C)	Entrance	R^2	Exit	R^2
1	0.1	190	0.21407	0.95822	0.29202	0.93763
2	0.1	210	0.19586	0.94988	0.29017	0.94986
3	0.1	230	0.17492	0.93873	0.28141	0.94909
4	0.15	190	0.24045	0.94914	0.32456	0.93876
5	0.15	210	0.21896	0.94911	0.32164	0.95871
6	0.15	230	0.1956	0.94988	0.31182	0.95907
7	0.2	190	0.29684	0.95817	0.36443	0.94975
8	0.2	210	0.27598	0.94091	0.35541	0.93765
9	0.2	230	0.25354	0.94761	0.34137	0.94415

Table 3. Machine learning circularity estimation results.

No	Feed	Printing temp	Hole circularity (mm)			
	(mm/rev)	(°C)	Entrance	R^2	Exit	R^2
1	0.1	190	4.90337	0.95265	5.018	0.93473
2	0.1	210	4.88285	0.94034	5.01207	0.94256
3	0.1	230	4.87888	0.93686	4.9787	0.94364
4	0.15	190	4.89664	0.94239	5.03303	0.93796
5	0.15	210	4.87586	0.94754	5.02096	0.95564
6	0.15	230	4.86805	0.94796	4.97428	0.95269
7	0.2	190	4.89631	0.95935	5.06864	0.94984
8	0.2	210	4.87248	0.94259	5.03953	0.93765
9	0.2	230	4.86821	0.94236	5.007	0.94347

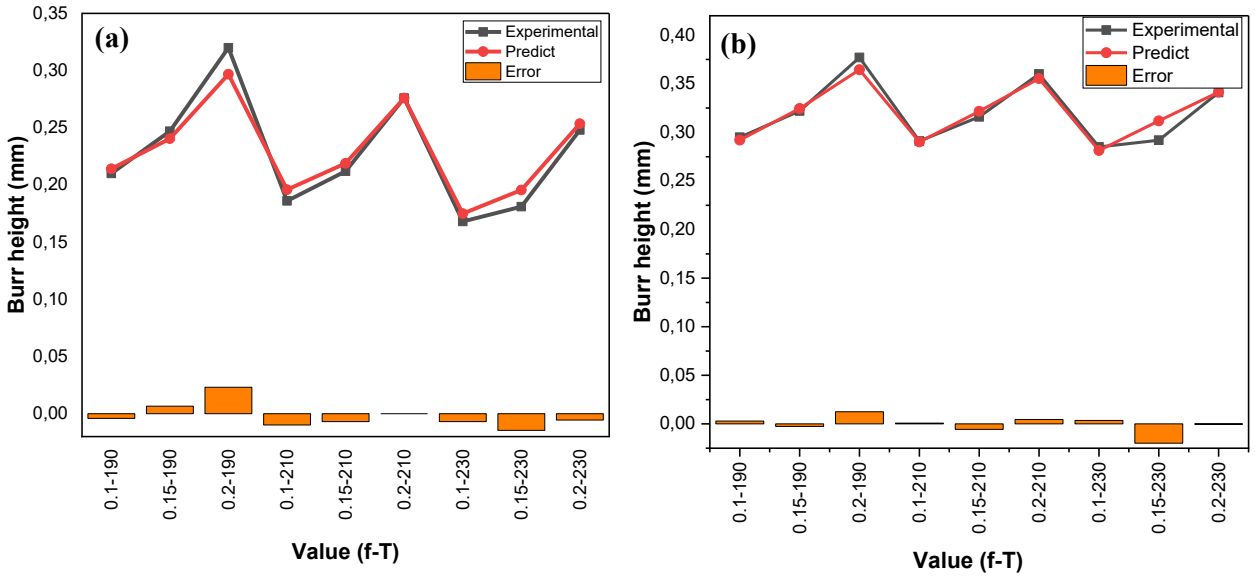


Figure 9. Circularity deviation measurement results; a) hole entrance, b) hole exit.

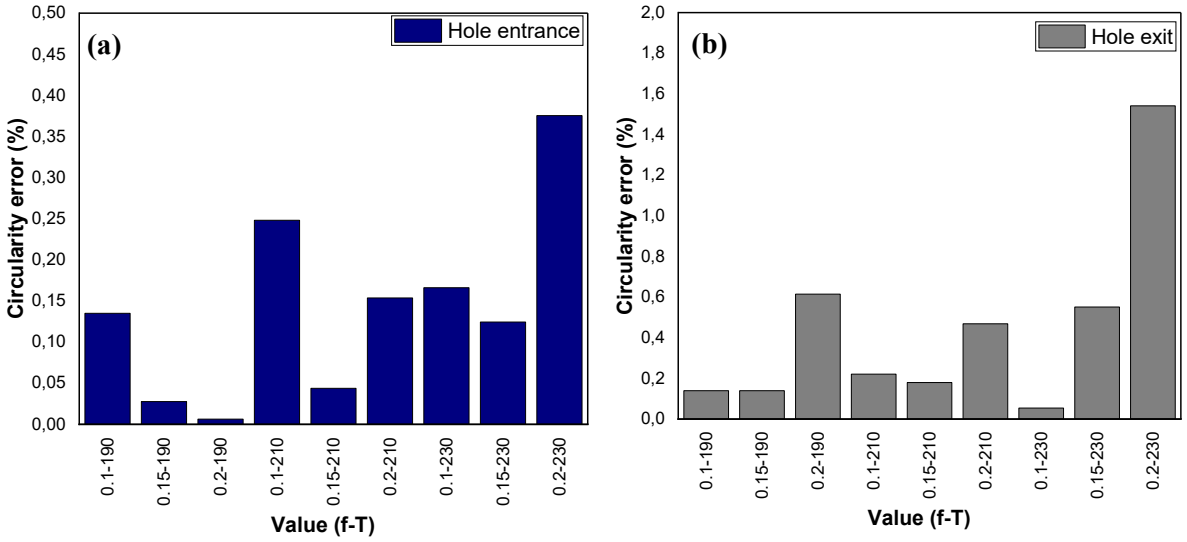


Figure 10. Circularity deviation measurement results; a) hole entrance, b) hole exit.

Conclusions

This work examined the correlation between burr development and deviations from circularity due to drilling operations at varying feeds of PLA samples generated at different printing temperatures using the FDM process, and a predictive model was developed utilizing machine learning methods. In this perspective, the data acquired from drilling experiments can be enumerated as follows:

1. During hole drilling operations, it was noted that the quantity and height of burrs generated due to enhanced interlayer bonding from elevated printing temperatures were significantly reduced compared to those at lower printing temperatures.

2. As the feed increases, the volume of chips removed per unit time also rises, resulting in an observable increase in burr height owing to chip removal occurring by pushing rather than cutting. Burr formation was identified as material accumulation at the hole entry and material extension at the hole exit. Consequently, the burr height at the hole exit was recorded as greater than that at the hole entry.

3. As a result of the increase in feed, the amount of chips removed per unit time increases and it becomes difficult to realise homogeneous cutting process. Therefore, deviation from circularity increases. By increasing the printing temperature, good bonding between the layers is achieved and brittleness is reduced. This decreased the deviation from circularity.

4. The success of the prediction method prepared with the machine learning method is around 94% on average. In addition, it was observed that there was a low deviation between the experimental data and the data obtained with

the prediction model. In this respect, the machine learning model provides effective prediction results.

The results show that printing temperature and feed have significant effects on burr formation and circularity in the production and perforation of PLA. Controlling these parameters to minimise defects would make both AM production and post-production post-processing more efficient. This study will be important for future studies on the drilling of PLA in a wider range of AM production parameters and drilling parameters, as well as for future studies by applying different processing techniques and different production materials.

Interest statement

There is no need to obtain permission from the ethics

committee for the article prepared.

There is no conflict of interest with any person / institution

in the article prepared.

Authors' Contributions

Ender Emir: Conceptualization, Acquisition of data, Methodology, Supervision, Validation, Writing

References

[1] X. Zhang, L. Chen, T. Mulholland, and T. A. Osswald, "Effects of raster angle on the mechanical properties of PLA and Al/PLA composite part produced by fused deposition modeling," *Polym. Adv. Technol.*, vol. 30, no. 8, pp. 2122–2135, Aug. 2019, doi: 10.1002/pat.4645.

[2] N. Naveed, "Investigate the effects of process parameters on material properties and microstructural changes of 3D-printed specimens using fused deposition modelling (FDM)," *Mater. Technol.*, vol. 36, no. 5, pp. 317–330, Apr. 2021, doi: 10.1080/10667857.2020.1758475.

[3] O. Tunçel, "The influence of the raster angle on the dimensional accuracy of FDM-printed PLA, PETG, and ABS tensile specimens," *Eur. Mech. Sci.*, vol. 8, no. 1, pp. 11–18, Mar. 2024, doi: 10.26701/ems.1392387.

[4] A. W. Gebisa and H. G. Lemu, "Influence of 3D Printing FDM Process Parameters on Tensile Property of ULTEM 9085," *Procedia Manuf.*, vol. 30, pp. 331–338, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.02.047.

[5] M. A. Albadrani, "Effects of Raster Angle on the Elasticity of 3D-Printed Polylactic Acid and Polyethylene Terephthalate Glycol," *Designs*, vol. 7, no. 5, p. 112, Sep. 2023, doi: 10.3390/designs7050112.

[6] V. Mohanavel, K. S. Ashraff Ali, K. Ranganathan, J. Allen Jeffrey, M. M. Ravikumar, and S. Rajkumar, "The roles and applications of additive manufacturing in the aerospace and automobile sector," *Mater. Today Proc.*, vol. 47, pp. 405–409, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.04.596.

[7] P. K. Gurrala and S. P. Regalla, "Part strength evolution with bonding between filaments in fused deposition modelling," *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 9, no. 3, pp. 141–149, Jul. 2014, doi: 10.1080/17452759.2014.913400.

[8] M. Eryıldız, "Effect of Build Orientation on Mechanical Behaviour and Build Time of FDM 3D-Printed PLA Parts: An Experimental Investigation," *Eur. Mech. Sci.*, vol. 5, no. 3, pp. 116–120, 2021, doi: 10.26701/ems.881254.

[9] B. Vo, A. Ajibade, M. Rosengren, K. Pena, and M. Moran, "The Effect of 3D Printing Temperature on the Mechanical Properties of Polypropylene" J. *of Undergraduate Chemical Eng. Rsch*., vol. 8, no. 1, pp. 24-31, 2019.

[10] J. Ivorra-Martinez, M. Á. Peydro, J. Gomez-Caturla, L. Sanchez-Nacher, T. Boronat, and R. Balart, "The effects of processing parameters on mechanical properties of 3D-printed polyhydroxyalkanoates parts," *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 18, no. 1, 2023, doi: 10.1080/17452759.2022.2164734.

[11] O. Ulkir, I. Ertugrul, S. Ersoy, and B. Yağımlı, "The Effects of Printing Temperature on the Mechanical Properties of 3D-Printed Acrylonitrile Butadiene Styrene," *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 8, p. 3376, Apr. 2024, doi: 10.3390/app14083376.

[12] F. Rivera-López, M. M. L. Pavón, E. C. Correa, and M. H. Molina, "Effects of Nozzle Temperature on Mechanical Properties of Polylactic Acid Specimens Fabricated by Fused Deposition Modeling," *Polymers (Basel).*, vol. 16, no. 13, p. 1867, Jun. 2024, doi: 10.3390/polym16131867.

[13] E. C. R. de Melo, L. M. F. Lona, and R. P. Vieira, "Effects of filament extrusion temperature and 3D printing parameters on the structure and mechanical properties of poly(butylene adipate-co-terephthalate)/poly (lactic acid) blends," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 65, no 3, Dec. 2024, doi: 10.1002/pen.27073.

[14] S. Rawal, A. M. Sidpara, and J. Paul, "A review on micro machining of polymer composites," *J. Manuf. Process.*, vol. 77, pp. 87–113, May 2022, doi: 10.1016/j.jmapro.2022.03.014.

[15] M. Altan and E. Altan, "Investigation of burr formation and surface roughness in drilling engineering plastics," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 36, no. 2, pp. 347–354, Feb. 2014, doi:

10.1007/s40430-013-0089-8.

[16] P. Shanmughasundaram and R. Subramanian, "Study of parametric optimization of burr formation in step drilling of eutectic Al–Si alloy–Gr composites," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 150–157, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.jmrt.2014.03.008.

[17] M. A. Kadivar, R. Yousefi, J. Akbari, A. Rahi, and S. M. Nikouei, "Burr Size Reduction in Drilling of Al/SiC Metal Matrix Composite by Ultrasonic Assistance," *Adv. Mater. Res.*, vol. 410, pp. 279–282, Nov. 2011, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.410.279.

[18] A. Saravanakumar and P. Sasikumar, "Assessment of factors influencing burr height on the machining of particle reinforced hybrid composites," *J. Mater. Environ. Sci.*, vol. 6, no. 6, pp. 1638–1645, 2015.

[19] A. A. Thakre and S. Soni, "Modeling of burr size in drilling of aluminum silicon carbide composites using response surface methodology," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 19, no. 3, pp. 1199–1205, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.jestch.2016.02.007.

[20] A. Pramanik and A. K. Basak, "Effects of Input Parameters on the Hole Quality During the Drilling of Al Metal Matrix Composites," *Designs*, vol. 8, no. 6, p. 111, Oct. 2024, doi: 10.3390/designs8060111.

[21] E. Emir, B. Özdemir, E. Bahçe, and G. Erener, "Investigation of Delamination in the Drilling of PLA Specimens with Different Lattice Structures," *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg.*, vol. 29, no. 2, pp. 708–719, 2024, doi: 10.53433/yyufbed.1401574.

[22] A. Lotfi, H. Li, and D. V. Dao, "Analytical and experimental investigation of the parameters in drilling flax/poly(lactic acid) bio-composite laminates," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 109, no. 1–2, pp. 503–521, 2020, doi: 10.1007/s00170-020-05668-1.

[23] B. V. Kavad, A. B. Pandey, M. V. Tadavi, and H. C. Jakharia, "A Review Paper on Effects of Drilling on Glass Fiber Reinforced Plastic," *Procedia Technol.*, vol. 14, pp. 457–464, 2014, doi: 10.1016/j.protcy.2014.08.058.

[24] R. Pang, M. K. Lai, K. I. Ismail, and T. C. Yap, "The Effect of Printing Temperature on Bonding Quality and Tensile Properties of Fused Deposition Modelling 3d-Printed Parts," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1257, no. 1, p. 012031, 2022, doi: 10.1088/1757-899x/1257/1/012031.

[25] M.-H. Hsueh *et al.*, "Effects of Printing Temperature and Filling Percentage on the Mechanical Behavior of Fused Deposition Molding Technology Components for 3D Printing," *Polymers (Basel).*, vol. 13, no. 17, p. 2910, Aug. 2021, doi: 10.3390/polym13172910.

[26] M.-H. Hsueh *et al.*, "Effect of Printing Parameters on the Thermal and Mechanical Properties of 3D-Printed PLA and PETG, Using Fused Deposition Modeling," *Polymers (Basel).*, vol. 13, no. 11, p. 1758, May 2021, doi: 10.3390/polym13111758.

[27] V. Cojocaru, D. Frunzaverde, C. O. Miclosina, and G. Marginean, "The Influence of the Process Parameters on the Mechanical Properties of PLA Specimens Produced by Fused Filament Fabrication—A Review," *Polymers (Basel).*, vol. 14, no. 5, 2022, doi: 10.3390/polym14050886.

[28] M. Baraheni, M. R. Shabgard, S. Amini, and F. Gholipour, "Experimental evaluation and optimization of parameters affecting delamination, geometrical tolerance and surface roughness in ultrasonic drilling of 3D-Printed PLA thermoplastic," *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, pp. 1–30, 2024, doi: 10.1177/08927057241264803.

Dicle University
Journal of Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/dumf
duje.dicle.edu.tr

Araştırma Makalesi / Research Article

Hidrojen yakıt hücreli enerji sistemlerinde kullanılan ara soğutucu manifold giriş yapısının ısıl ve akış davranışına etkisinin sayısal incelemesi

Numerical investigation of the effect of intercooler manifold inlet geometry on thermal and flow behavior in hydrogen fuel cell energy systems

Gülenay A. Kılıç

Yalova Üniversitesi, Yalova Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, gulenay.kilic@yalova.edu.tr
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3513-8785

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 8 Nisan 2025
Revizyon 7 Mayıs 2025
Kabul 17 Mayıs 2025
Online 30 Haziran 2025

Anahtar Kelimeler:

Hidrojen yakıt hücresi enerji sistemi,
Termal enerji sistemleri,
Ara soğutucu,
Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD),
Isı transferi,
Akış analizi

ÖZ

Küresel ölçekte net sıfır emisyon hedefleri, taşımacılık sektörünü alternatif enerji sistemlerine yönlendirmektedir. Hidrojen yakıt hücreli araçlar, özellikle ağır vasıta taşımacılığında düşük karbonlu bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bu sistemlerin sürdürülebilir ve verimli çalışması için etkin termal enerji yönetimi kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, hidrojen yakıt hücreli taşıtlara yönelik geliştirilen bir ara soğutucunun enerji verimliliği incelenmiştir. Çalışmada tek kademeli giriş yapısına sahip birinci model ve çift kademeli giriş yapısına sahip ikinci model olmak üzere iki farklı tasarım ele alınmıştır. Her iki model için beş farklı hava giriş hızında termal enerji ve akış davranışları hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yöntemiyle analiz edilmiştir. Sayısal sonuçlar, model 2'nin model 1'e kıyasla önemli avantajlar sunduğunu göstermiştir. Özellikle 5 m/s giriş hızında, ısı transfer performansının akış direncine oranı (j/f) değerinde %22,50 artış elde edilmiştir. Aynı zamanda basınç kaybında %10,30 azalma sağlanmıştır. Ayrıca, model 2 çıkış sıcaklık dağılımlarında daha homojen bir yapı sergilemiş ve cidar bölgelerinde sıcaklık düşüşü daha belirgin şekilde gözlemlenmiştir. Bu bulgular, enerji sistemlerinde ara soğutucu tasarımında giriş geometrisinin enerji verimliliği açısından belirleyici bir parametre olduğunu göstermektedir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 8 April 2025
Received in revised form 7 May 2025
Accepted 17 May 2025
Available online 30 June 2025

Keywords:

Hydrogen fuel cell energy system,
Thermal energy systems (TES),
Intercooler,
Computational fluid dynamics (CFD),
Heat transfer,
Flow analysis

DOI: 10.24012/dumf.1672063

ABSTRACT

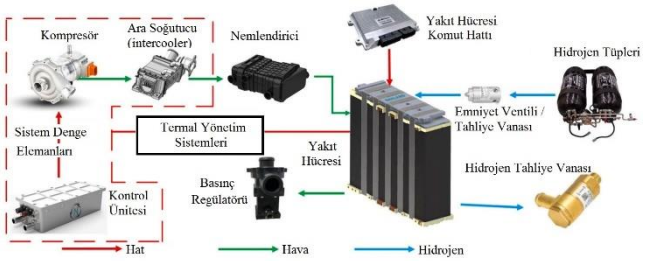
Global net-zero emission targets are directing the transportation sector towards alternative energy systems. Hydrogen fuel cell vehicles stand out as a low-carbon solution, particularly in heavy-duty transport applications. Effective thermal energy management is critically important for the sustainable and efficient operation of these systems. In this study, the energy efficiency of an intercooler developed for hydrogen fuel cell vehicles was investigated. Two different designs were considered: the first model with a single-stage inlet structure, and the second model with a dual-stage inlet structure. For both models, thermal energy and flow behavior were analyzed using computational fluid dynamics (CFD) at five different air inlet velocities. Numerical results demonstrated that Model 2 offered significant advantages over Model 1. Specifically, at an inlet velocity of 5 m/s, a 24.44% increase in the ratio of heat transfer performance to flow resistance (j/f) was achieved. Simultaneously, a 10.71% reduction in pressure drop was observed. Moreover, Model 2 exhibited a more homogeneous outlet temperature distribution, with more pronounced temperature reduction near the wall regions. These findings indicate that inlet geometry is a critical parameter in intercooler design for enhancing energy efficiency in energy systems.

Giriş

Hidrojen yakıt hücreli sistemler, sıfır emisyon özellikleri ve yüksek enerji verimlilikleri nedeniyle gelecek vaat eden temiz enerji teknolojileri arasında yer almaktadır [1-2]. Özellikle otomotiv sektöründe, hidrojen yakıt hücreli araçlar (FCEV), içten yanmalı motorlu araçlara alternatif bir güç sistemi olarak değerlendirilmektedir. Bu araçlar, hidrojen ve oksijenin elektrokimyasal reaksiyonu sonucunda sadece su buharı açığa çıkararak elektrik üretmektedir [3]. Ancak, bu sistemlerin verimli çalışabilmesi için etkili termal yönetim stratejilerine ihtiyaç duyulmaktadır [4].

Polimer elektrolit membran yakıt hücreleri (PEMFC), düşük çalışma sıcaklığı, hızlı başlangıç süresi ve yüksek güç yoğunluğu nedeniyle otomotiv uygulamalarında en yaygın kullanılan yakıt hücresi türüdür [5]. PEMFC'ler genellikle 50–80 °C aralığında verimli çalışır; bu aralığın dışına çıkılması performans kaybına, membran bozulmasına ve su yönetimi sorunlarına yol açmaktadır [6]. Hidrojen yakıt hücreli sistemlerde ara soğutucular, kompresörden çıkan havayı soğutarak hücre verimini artırmakta ve ömrünü uzatmakla beraber nem kontrolüne katkı sağlamaktadır [7].

Ara soğutucular, soğutma mekanizmalarına göre hava soğutmalı ve sıvı soğutmalı olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır [8]. Sıvı soğutmalı ara soğutucular, yüksek ısı transferi ve kompakt tasarım avantajlarıyla tercih edilmektedir [9-10]. Özellikle, yüksek güç yoğunluğuna sahip hidrojen yakıt hücreli sistemlerde, sıvı soğutmalı ara soğutucular daha etkili bir termal yönetim sağlamaktadır [7-11].



Şekil 1. Yakıt hücresi proses şeması [7]

Hidrojen yakıt hücreli sistemlerde kullanılan ısı eşanjörleri üzerine yapılan çalışmalar son yıllarda artmaktadır. Zang vd. (2025), PEMFC soğutma sistemlerinde farklı soğutma stratejilerinin avantaj ve dezavantajlarını tartışmışlardır [12]. Zhang et al. (2025), yakıt hücresi yığınlarında sıcaklık gradyanlarının sistem verimliliğini düşürdüğünü ve homojen sıcaklık dağılımının performans için kritik olduğunu ortaya koymuştur. [13].

PEM yakıt hücresinin performansı üzerine Tian et al. (2023), üç farklı kanal kesiti için CFD ile analiz yaparak en-boy oranının ısı transferi ve basınç düşüşüne etkisini incelemiş ve optimum geometri önermiştir [14]. Kim ve ark. (2023), hidrojen termal yönetiminde paralel ve dalgalı kanalları sayısal olarak inceleyerek kanal boyutlarının performansa etkisini değerlendirmiştir [15]. Kaiser ve ark., düz ve dalgalı akış kanallarına sahip PEMFC'lerin performans ve kütle transferi özelliklerini inceleyerek, deneysel ve sayısal analizlerle doğrulanan sonuçlara göre dalgalı kanalların konveksiyon yoluyla kütle transferini artırdığını göstermiştir [16].

Yakıt hücreli sistemlerde ara soğutucunun termal performansı, akışkan hızına bağlı olarak değişir; artan hava hızı, sınır tabaka bozunmasıyla konvektif ısı transferini artırır [17]. Artan *Re* sayısı, türbülansı ve ısıl etkileşimi artırarak çapraz akışlı ara soğutucularda sıcaklık farklarının daha hızlı dengelenmesini sağlar [18]. Bu nedenle, hava hızının sistem tasarımında optimize edilmesi hem hücre performansını korumak hem de soğutma yükünü azaltmak açısından önem arz etmektedir.

Artan hava hızı, ısı transferinin yanı sıra akışkan dinamiğini de etkiler; dar ve keskin kenarlı yapılarda basınç kayıpları artar, Fanning katsayısı (*f*) ise yüksek Re'de artış gösterebilir [19]. Bu durum, termal verimliliğin artırılmasıyla eş zamanlı olarak basınç kaybının da kontrol altında tutulmasını gerektirmekte ve iki performans kriteri arasında hassas bir denge kurulmasını zorunlu kılmaktadır. Son yıllarda hidrojenle çalışan sistemlerde kompakt ısı değiştirici tasarımlarına yönelik yapılan çalışmalar, hava akış hızı ile ısıl performans arasındaki ilişkiye dikkat çekmektedir. Patrao et al. (2024), hidrojenli turbofan motorlar için geliştirilen entegre ara soğutucu sistemlerinde, farklı tasarımların aerodinamik optimizasyonunu incelemiş; artan hava hızının $\in$–NTU temelli analizlerle ısı transferini artırırken, belli bir eşikten sonra basınç kayıplarını da artırdığını ortaya koymuştur [20]. Literatürde, bu dengenin sağlanabilmesi için hem geometri optimizasyonu hem de uygun hız aralıklarının belirlenmesi gerektiği vurgulanmaktadır [8].

Baek et al. (2011), düz kanallı soğutma plakalarında geometrik parametrelerin sistem performansını doğrudan etkilediğini göstermiştir [21]. Zhang et al. (2022), düz kanal konfigürasyonlarının performansını farklı akış koşulları altında incelemiştir. [22]. Literatürde, farklı ısı eşanjörü tasarımları üzerine çalışmalar bulunmakla birlikte, farklı kesitli kanal giriş geometrisinin hidrojen sistemlerindeki ara soğutucu uygulamaları üzerine kapsamlı çalışmalar sınırlıdır. Özellikle, farklı çalışma koşulları altında üçgen kesitli ve boru içi soğutkan olan ara soğutucuların performansını inceleyen detaylı CFD analizleri eksiktir. Literatürde genellikle mikro-geometri (tek kanal ya da kanatçık) üzerinden çalışmalar yoğunluktayken, tüm ara soğutucu sistemini kapsayan sayısal analizler sınırlıdır. Bu çalışmada tam ölçekli bir su soğutmalı ara soğutucu için farklı manifold giriş-çıkış geometrilerinin ve farklı hava hızlarının termal enerji ve hidrodinamik etkisi CFD kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen veriler boyutsuz sayılar yardımıyla analiz edilerek, farklı manifold geometrileri ve hava hızlarının ısı transferi etkinliği, basınç kaybı ve akış düzgünlüğü açısından karşılaştırmalı değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir.

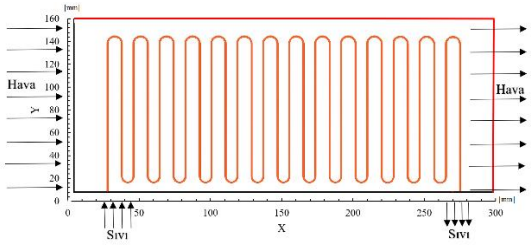
Sayısal Modelleme ve CFD Analiz Metodolojisi

Çalışmada çapraz akışlı ara soğutucu için iki farklı model geliştirilmiştir. Şekil 2'de bu modeller sunulmaktadır: (a)

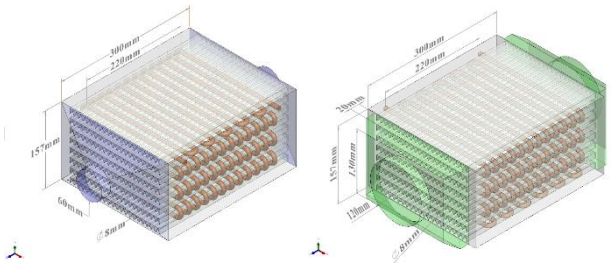
şematik çizim, (b) tek kademeli hava girişli model (Model 1) ve (c) çift kademeli girişli model (Model 2). Yakıt hücresi sistemine yönlendirilen hava ve soğutucu sıvı akışkan çapraz yönlerde dolaşacak şekilde düzenlenmiştir. Bu düzenleme maksimum ısı transferi verimini sağlamayı amaçlamaktadır. Soğutkanın dolaştığı boru hattı 8 sıra düşey ve 12 sıra yatay olarak dizilmiştir. Sistemde sabit su debisi 0.15 kg/s ve giriş sıcaklığı 40°C olarak tanımlanmıştır. Soğutucu gövde içerisinde 7 sıra üçgen kesitli kanatçık yer almaktadır. Hava tarafında 100 °C giriş sıcaklığı 1-9 m/s aralığında beş farklı hız için 10 senaryo modellenmiştir. Sayısal analizler ANSYS Fluent 2023 R2 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, hesaplamalı modelin sadeleştirilmesi ve sonuçların doğruluğundan ödün vermeksizin hesaplama maliyetinin azaltılması amacıyla bazı varsayımlar yapılmıştır. Akışın sürekli, üç boyutlu ve türbülanslı olduğu kabul edilmiştir. Çalışma akışkanı olan havanın ideal gaz davranışı gösterdiği varsayılmıştır. Havanın viskozite ve ısıl iletkenlik gibi fiziksel özelliklerinin sabit olduğu öngörülmüş ve Boussinesq yaklaşımı uygulanmamıştır. Radyasyonla ısı transferi, ele alınan çalışma koşullarında konveksiyon ve iletime kıyasla ihmal edilebilir düzeyde olduğundan göz ardı edilmiştir. Akış ve ısı transferi üzerindeki yerçekimi etkileri dikkate alınmamıştır. Akış alanını çevreleyen duvarların pürüzsüz, rijit ve aksi belirtilmedikçe termal olarak yalıtılmış olduğu varsayılmıştır. Tüm katı-akışkan arayüzlerinde kaymasız sınır koşulu uygulanmıştır. Çıkışta akışın tam gelişmiş olduğu kabul edilerek geri akış oluşmayacağı varsayılmış, bu durum uygulanan basınç sınır koşullarıyla desteklenmiştir. Su soğutmalı hazne yapısının duvar sıcaklığı boyunca sabit olduğu düşünülmüş ve ısı değiştirici ile temas eden yüzey boyunca ısı akısının sabit olduğu varsayılmıştır. Kanatçıkların içsel gözeneklilik veya yapısal kusur içermeyen, homojen ve katı yapılar olduğu kabul edilmiştir. Girişte türbülans yoğunluğu %5 olarak tanımlanmış ve türbülans modeli olarak k-ε modeli tercih edilmiştir. Ara soğutucu gövdesi, yüksek ısı iletkenliğine sahip alüminyum alaşım olan Al 6061-T6 olarak tanımlanmıştır.

Ara soğutucu gövdesi, yüksek ısı iletkenliğine sahip alüminyum alaşım olan Al 6061-T6 tanımlanmıştır. Giriş ve çıkış manifoldları, akışın kanallara homojen dağılımını sağlayacak şekilde optimize edilmiştir., Tüm parametrik çalışmalarda, toplam ısı transfer yüzey alanı karşılaştırılabilirlik açısından yaklaşık olarak sabit tutulmuştur.



(a)



(b) (c)

Şekil 2. Katı modellerin (a) su ve hava giriş-çıkış hattı (b) kademesiz izometrik görünüşü (c) kademeli izometrik görünüşü

CFD analizinde, süreklilik, momentum ve enerji korunum denklemleri üç boyutlu, kararlı durum koşulları altında çözülmüştür. Havanın akışı, ideal gaz yasasına göre sıkıştırılabilir akış olarak modellenmiş, soğutma sıvısı ise sıkıştırılamaz akış olarak kabul edilmiştir. Yönetici denklemler aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

Kütle korunumu denklemi Denklem 1 ile ifade edilirken *x, y* ve *z* yönleri için momentum korunum denklemleri sırasıyla Denklem 2-4 ile ifade edilmektedir [23];

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w)}{\partial z}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t}+div(\rho u u)=-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}+F_x \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t}+div(\rho v u)=-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}+F_y \tag{3}$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t}+div(\rho w u)=-\frac{\partial p}{\partial z}+\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}+F_z \tag{4}$$

Denklem 1'de ρ akışkan yoğunluğunu (kg/m³), *t* zamanı (s), *u, v, w* sırasıyla *x, y, z* yönlerindeki hız bileşenlerini (m/s) ifade etmektedir. *div* operatörü ise diverjans işlemini temsil etmektedir. Enerji korunum denklemi [23];

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t}+div(\rho u T)=div\left(\frac{k}{c_p}gradT\right)+S_T \tag{5}$$

Türbülans kinetik enerjisi için taşıma denklemi;

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M+S_k \tag{6}$$

Y_M, sıkıştırılabilir türbülanslarda türbülans salınımlarının yayılım terimidir. S_k, S_T, modelde tanımlanmış kaynak terimlerdir. Sıkıştırılamayan akışkanlar için $Y_M = 0$ alınır. Türbülans dağılım oranı (ε) için taşıma denklemi [21];

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k+C_{3\varepsilon}G_b)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}+S_\varepsilon \tag{7}$$

S_ε, kaynak terim; G_k, türbülans kinetik enerjisinin üretim terimi ve G_b, kaldırma kuvveti kaynak terimi olup aşağıdaki şekilde tanımlanır [23].

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (8)$$

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_i} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (9)$$

Sıkıştırılamayan akışkanlar için $G_b = 0$ alınır. Burada Pr_i, türbülanslı Prandtl sayısını ifade eder ve değeri genellikle 0.85 olarak alınır. g_i, i yönündeki yerçekimi bileşenini temsil eder. β, ısıl genleşme katsayısı olup aşağıdaki formülle tanımlanır [23]:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \quad (11)$$

Türbülans modellemesi için standart k-ε modeli tercih edilmiştir. Bu model, mühendislik uygulamalarında geniş kullanım alanına sahip olup, özellikle tam gelişmiş türbülanslı akışlar ve yüksek *Re* sayılarında güvenilir sonuçlar vermesiyle bilinmektedir [24]. Çalışma kapsamında incelenen ara soğutucu yapısı, keskin geçiş bölgeleri, kanatçık aralıklarında hız gradyenleri ve gelişmiş türbülans yapıları içermektedir. Bu gibi durumlarda k-ε modeli, çözüm kararlılığı, hesaplama maliyeti ve yakınsama açısından avantaj sağlamaktadır. Alternatif olarak kullanılan k-ω modeli, özellikle duvar yakınındaki ince sınır tabakalarda daha hassas çözüm sunsa da, yüksek türbülanslı alanlarda fazla duyarlı olması nedeniyle kararsızlık oluşturabilmekte ve geniş çözüm alanlarında daha yüksek hesaplama maliyeti doğurabilmektedir. RSM gibi daha gelişmiş modeller ise daha fazla hesaplama süresi gerektirmektedir. Bu nedenle, çalışmada kullanılan geometrik yapı ve akış koşulları dikkate alınarak hesaplama süresi ile doğruluk arasında denge sağlayan k-ε modeli tercih edilmiştir.

Malzeme özellikleri ve sınır koşulları

Analizlerde kullanılan malzeme özellikleri sıcaklığa bağlı olarak tanımlanmıştır. Hava için, yoğunluk ideal gaz denklemi ile hesaplanmış, viskozite, ısı iletim katsayısı ve özgül ısı ise sıcaklığın polinomsal fonksiyonları olarak modellenmiştir. Soğutma sıvısı ve hava için termofiziksel özellikler sıcaklığa bağlı kullanılmış ve alüminyum (Al) alaşımın termal özellikleri ise sabit değerler olarak kabul edilmiştir (Tablo 1).

Tablo 1. Malzeme özellikleri [23-25]

Malzeme (~298K)	**Yoğunluk (kg/m³)**	**Özgül ısı (J/kg·K)**	**Isı iletim katsayısı (W/m·K)**	**Viskozite (kg/m·s)**
Hava	0.0824	14.307	0.1805	8.92×10^{-6}
Su	997	4.182	0.607	8.9×10^{-4}
Al 6061-T6	2700	896	167	-

Sayısal analizlerde uygulanan sınır koşulları Tablo 2'de sunulmuştur. Simülasyonlar, hidrojen yakıt hücreli sistemlerin gerçek çalışma koşullarını temsil eden parametrelerle gerçekleştirilmiş olup, geniş bir operasyonel aralıkta ara soğutucu performansının değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Belirlenen sınır koşulları, otomotiv uygulamalarında karşılaşılan tipik değerlere dayanmakta ve farklı yük senaryolarını kapsamaktadır. Özellikle hidrojen ve soğutma sıvısı debileri, yakıt hücresi sisteminin düşük yükten tam yüke kadar değişen çalışma koşullarını simüle edecek şekilde seçilmiştir.

Tablo 2. Başlangıç ve sınır şartları

Sınır Bölgesi	**Sınır Koşulu Tipi**	**Değerler**
Gaz girişi	Kütlesel debi	0.035 kg/s
	Giriş sıcaklığı	100°C
	Hava hızı	10 m/s-15 m/s
Soğutma sıvısı girişi	Kütlesel debi	0.15 kg/s-9 l/dk
	Giriş sıcaklığı	40°C
Soğutma sıvısı çıkışı	Çıkış basıncı	95 kPa
Duvarlar	Kaymama koşulu	-
Dış yüzeyler	Adyabatik	-

Tablo 3'te sunulan hava tarafına ait geometrik ve akışa bağlı karakteristikler, ara soğutucu tasarımının termal ve hidrolik performansını doğrudan etkileyen temel belirleyicilerdir. İlk olarak, serbest akış alanı ile ön yüzey alanı oranı (σ_{air}) %74,3 olarak hesaplanmış olup, bu oran sistemin hava giriş düzleminde geniş açıklıklara sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, hava akışının daha az dirençle ilerlemesine olanak tanıyarak basınç kayıplarını azaltmakta ve fan yükünü optimize etmektedir. Diğer yandan, finlerin ön düzlemdeki kaplama oranını temsil eden $\kappa_{f,n}$ değeri %75,1 olarak belirlenmiş ve bu oran, giriş düzlemindeki alanın önemli bir kısmının ısı transferi sağlayan yüzeylerle kaplı olduğunu göstermektedir. Bu parametre, hem yüzeyin termal etkinliğini hem de alanın yapısal verimliliğini temsil etmekte olup, yüksek ısı akısı gerektiren uygulamalarda kritik bir tasarım kriteridir. F_{in} kalınlığı ve fin aralığı gibi mikrogeometrik parametreler, hava akış yollarının şekillenmesinde rol oynayarak hem yerel hız dağılımlarını hem de yüzeyle akışkan arasındaki ısıl etkileşimi belirleyen unsurlar arasında yer almaktadır [26].

Toplam hava tarafı ısı transfer alanının hava hacmine oranı olarak tanımlanan α_{air} parametresi, 109.66 m²/m³ olarak elde edilmiştir. Bu değer, kompakt ısı değiştiriciler için literatürde bildirilen değerlerle uyumlu olup, hacim başına düşen ısı transfer yüzeyinin yoğunluğunu göstermesi açısından sistemin termal kapasitesinin güçlü olduğunu işaret etmektedir. Hava tarafındaki hidrolik çapın 6–8 mm aralığında olması, akışın kanal içerisinde mikroyapılara ayrılmasını kolaylaştırmakta ve yüzey etkileşimini artırarak ısı aktarımını desteklemektedir. Boru cidar kalınlığının 0.25 mm olarak tutulması ise, ısı iletiminin direnç oluşturmadan iç ortamdan dış yüzeye aktarılmasına olanak tanımakta ve sistemin ısıl iletkenliğini iyileştirmektedir. Bu geometrik özellikler bir bütün olarak değerlendirildiğinde, ara soğutucunun hem ısı aktarımı hem de akışkan dinamiği açısından optimize edildiği ve hidrojen yakıt hücreli

sistemlerin yüksek performans gereksinimlerine uygun bir tasarım sunduğu söylenebilir.

Tablo 3. Katı modelin parametreleri

Parametre	Değer	Birim	Açıklama
Serbest akış alanı / cephe alanı (σ_{air})	0,7432		Finler arasındaki açık alanın, toplam giriş alanına oranı (akış açıklığı)
Fin alanı / toplam alan ($\kappa_{f,n}$)	0,7506		Finlerin giriş düzleminde kapladığı 2D alanın, toplam alana oranı olup alan kullanım etkinliğini ifade eder. Termal performans ve basınç kaybı eğilimini göstermektedir.
Fin aralığı ($s_{f,n}$)	10	mm	İki fin tabanı arası boşluk (hava geçiş aralığı)
Fin kalınlığı	0.5–1	mm	Her bir finin et kalınlığı (ısı iletim mesafesi)
Hava tarafı toplam yüzey alanı / hacim (α_{air})	109.66	m^2/m^3	Havanın temas ettiği toplam yüzey alanının, hava hacmine oranı olup ısı transfer yüzey yoğunluğunu temsil eder.
Boru cidar kalınlığı (t_{tube})	0.25	mm	Su taşıyan boruların cidar kalınlığı (iletim direnci)
Hava tarafı hidrolik çap (D_h)	6–8	mm	Hava kanallarının etkin çapı, basınç kaybı ve Reynolds (Re) sayısı hesaplamalarında kullanılır

Literatürde benzer termal amaçlara yönelik farklı bir ara soğutucu tasarımı üzerinde yapılan bir çalışmada SIMPLEC algoritması kullanılmıştır [8]. SIMPLEC, basınç-hız bağlamını ardışık (segregated) olarak çözen bir yöntemdir ve düşük türbülans seviyesine sahip, tek yönlü ve kararlı akışlarda yeterli performans sunabilmektedir. Ancak, özellikle bu çalışmada olduğu gibi düşük Mach sayısında fakat yüksek sıcaklık gradyenleri, yoğunluk değişimleri, ince kanallı yapı ve çapraz akış prensibi gibi parametrelerin bir arada bulunduğu sistemlerde, SIMPLEC algoritmasının sayısal difüzyonu artırma, basınç salınımları üretme ve yavaş yakınsama gibi sınırlamaları ortaya çıkabilmektedir. Buna karşılık, coupled algoritması momentum ve basınç denklemlerini eşzamanlı olarak çözmekte, böylece sistemin genel sayısal kararlılığını artırmakta ve daha hızlı yakınsamaya olanak sağlamaktadır. Ayrıca türbülanslı geçiş bölgelerinde yapay basınç salınımlarını baskılaması, transient çözüm süreçlerinde daha az iterasyon ihtiyacı ile zaman kazandırması ve yüksek sıcaklık farklarına sahip geçiş bölgelerinde sayısal difüzyonu azaltması bakımından coupled yaklaşımı önemli avantajlar sunmaktadır. Bu yüzden bu çalışmada kullanılan çözüm algoritması, Yu vd.'nin çalışmasında kullanılan yöntemle karşılaştırıldığında hem çözüm doğruluğu hem de sayısal verimlilik açısından daha uygun bir seçim olarak öne çıkmakta olup Tablo 4'de sınıflandırılmıştır [8]. Bu çalışmada, akışkan akışı ve ısı transferi arasındaki etkileşimleri daha kararlı ve doğru biçimde çözümleyebilmek amacıyla, ANSYS Fluent yazılımında basınç-temelli coupled algoritması tercih edilmiştir. Basınç-hız bağlaşımı için coupled algoritması tercih edilmiş, momentum ve enerji denklemleri için ikinci dereceden upwind ayrıklaştırma şeması uygulanmıştır. Yakınsama kriterleri; enerji denklemi için ise 10^{-8}, süreklilik, momentum ve türbülans denklemleri için 10^{-5} olarak belirlenmiştir.

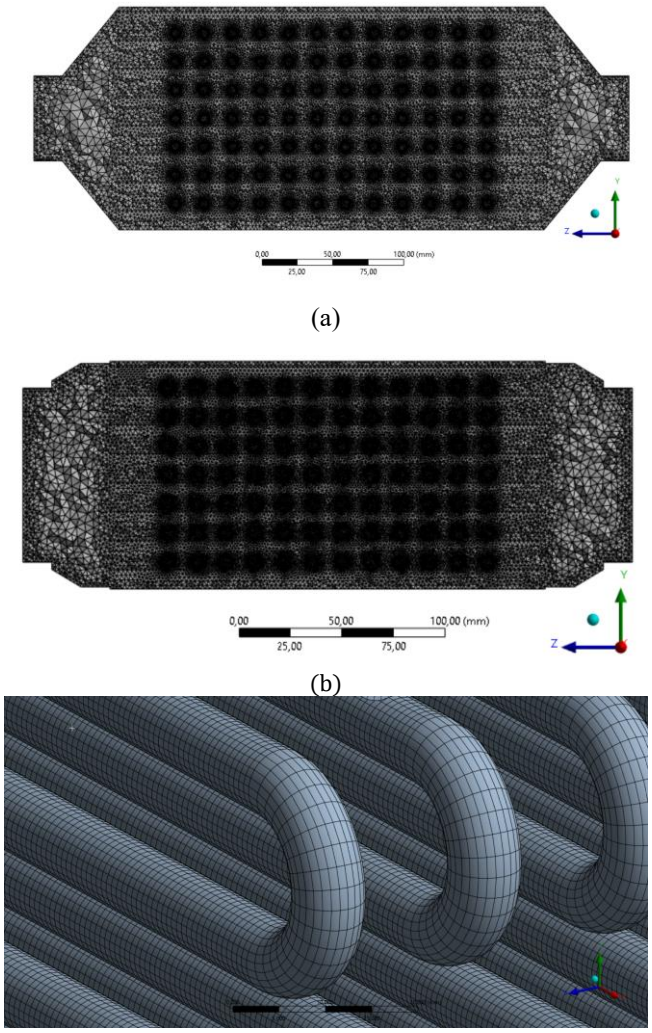
Tablo 4. Basınç-hız bağlaşım yöntemlerinin termal yönetim uygulamalarındaki göreli performansları

Yöntem	Açıklama	Kullanım Durumu
SIMPLE	Basit, kararlı ve en yaygın kullanılan yöntem	Steady (kararlı) akışlarda
SIMPLEC	SIMPLE'ın geliştirilmiş versiyonu ve daha hızlı yakınsama	Kararlı ama daha hızlı çözüm istenen durumlarda
PISO	Zamana bağlı (transient) akışlarda yakınsama yüksek	Unsteady (zamana bağlı)
Coupled	Basınç ve hız denklemlerinde aynı anda çözüm fakat uzun çözüm süresi	Yoğunluk değişimi olan, ısı transferli, sıkıştırılabilir akışlarda (örneğin: ideal gaz + enerji)

Ağ bağımsızlık analizi

Sayısal çözüm süreçlerinde hesaplamalı ağ yapısı, çözüm doğruluğu ve hesaplama verimliliği arasında optimum denge sağlayacak şekilde oluşturulmalıdır [26-27]. ANSYS Fluent 2023 R2 yazılımı kullanılmıştır. Sayısal çözüm doğruluğunu değerlendirmek amacıyla üç farklı ağ yoğunluğuna sahip model üzerinde karşılaştırmalı analizler yapılmıştır sırasıyla düşük (1.8 milyon eleman), orta (15 milyon eleman) ve yüksek (50 milyon eleman). Tüm ağ yapılarında y+ değeri 1'in altında olacak şekilde sınır tabaka inceliği korunmuştur.

Kanal içerisindeki sınır tabaka akışını doğru çözümleyebilmek için, duvar yakınlarında ağ yapısı inceltilmiş ve y+ değerinin 1'in altında kalması sağlanmıştır. Toplam eleman sayısı model 1 ve model 2 için tetrahedral ve hexahedral elemanların hibrit kombinasyonu kullanılarak sırasıyla yaklaşık olarak 15 milyon ve 21 milyondur. Duvar yakınlarındaki akış davranışını doğru çözümleyebilmek için y+ değeri 1'in altında tutulmuştur; bu değer, türbülans modellerinin duvar fonksiyonlarını doğru şekilde uygulayabilmesi için kritik öneme sahiptir. Şekil 3(a) ve (b) iki modelin genel hacmini kapsayan ağ yapısını göstermektedir. Bu görünüm, modelin homojen şekilde ağlandığını ve tüm hacimde çözüm hassasiyetinin sağlandığını ortaya koymaktadır. Şekil 3(c) ise kanal iç bölgesine ait boru hattının detay ağ yapısını sunmakta olup, özellikle sınır tabaka bölgelerinde ağ sıklaştırmasının sağlandığını ve duvar yakınlarında y+ değerinin kontrol altında tutulduğunu göstermektedir. Bu yerel sıklaştırmalar, laminer, geçiş ve türbülans modelinin doğruluğu ve konveksiyonla ısı transferinin doğru modellenmesi açısından kritik öneme sahiptir.



(a)

(b)

(c)

Şekil 3. Modellerin hesaplamalı ağ yapısı: (a) model 1 (b) model 2 (c) ağ detay yapısı

Ağ hassasiyetinin değerlendirilmesinde, çıkış sıcaklığı, ısı transfer katsayısı ve toplam basınç kaybı parametreleri kullanılmıştır. Orta yoğunluklu ağ yapısı, hesaplama süresi ve doğruluk açısından en uygun yapı olarak belirlenmiştir. Orta ve yüksek ağ yoğunlukları arasında elde edilen maksimum farklar sırasıyla çıkış sıcaklığı için %0.78, basınç kaybı için %1.15 ve ortalama ısı transfer katsayısı için %1.60 olarak hesaplanmıştır. Bu farkların kabul edilebilir sınırlar içinde kalması, orta yoğunluklu ağ yapısının hem çözüm doğruluğu hem de işlem süresi açısından yeterli olduğunu göstermektedir. Tablo 5 ile ağ yoğunluğu değişimine bağlı olarak temel parametrelerde gözlenen farkları özetlenmektedir.

Tablo 5. Orta ve yüksek ağ yapısı arasındaki farkların yüzde değerleri

Karşılaştırılan Parametreler	**Fark (%)**
Çıkış Sıcaklığı	0.78
Basınç Kaybı	1.15
Ortalama Isı Transfer Katsayısı	1.60

Bu sonuçlar doğrultusunda, çalışmanın kalan tüm analizlerinde hesaplama süresi ile çözüm doğruluğu arasında optimum dengeyi sağlayan orta yoğunluklu ağ yapısı tercih edilmiştir.

Boyutsuz sayıların tanımı ve kullanımı

Bu çalışmada, farklı kanatçık geometrilerine sahip ara soğutucu yapıların termal-hidrolik performanslarını karşılaştırmak amacıyla çeşitli boyutsuz büyüklükler kullanılmıştır. Literatürde yaygın şekilde kullanılan *Re*, *ΔP*, *f* ve colburn *j* faktörü, analizlerde temel parametreler olarak değerlendirilmiştir.
Re, akış rejimini tanımlamak ve türbülansın etkisini değerlendirmek için kullanılır. Bu çalışma kapsamında, *Re* sayısı aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$Re = \frac{\rho . u . D_h}{\mu} \tag{12}$$

Burada ρ akışkan yoğunluğu (kg/m³), u ortalama akış hızı (*m/s*), D_h hidrolik çap (*m*) ve μ dinamik viskoziteyi (Pa·s) temsil etmektedir. *Re* sayısı, farklı geometrilerin türbülanslı akış rejiminde nasıl davrandığını analiz etmek açısından kritik öneme sahiptir [28–30]. Basınç kayıplarını değerlendirmek için *f* katsayısı kullanılmıştır. Bu katsayı, kanatçıklar arasındaki basınç farkının hidrodinamik etkisini boyutsuzlaştırır ve aşağıdaki denklemle tanımlanır:

$$f = \frac{\Delta P . D_e}{4l} / \frac{\rho . u_m^2}{2} \tag{13}$$

Burada *ΔP* basınç farkı (Pa), D_e eşdeğer çap (m), *l* akış uzunluğu (m) ve u_m ortalama hızdır. Bu katsayı, özellikle dar kanatçıklı yapılarda akışa karşı oluşan direnç hakkında bilgi verir [30-32]. Isı transfer performansını değerlendirmek için Colburn *j* faktörü kullanılmıştır. Bu faktör, konvektif ısı transfer katsayısını boyutsuzlaştırarak farklı yüzey yapılarını karşılaştırmada kullanılmaktadır. j faktörü aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$j = \frac{Nu . Pr^{-1/3}}{Re} \tag{14}$$

Burada Nusselt (*Nu*) sayısı ve Prandtl *(*Pr*)* sayısıdır. Colburn faktörü, özellikle *Re* sayısına bağlı olarak ısı transferindeki artışı karakterize etmek için yaygın biçimde kullanılmaktadır [29, 33-35]. Termal-hidrolik sistemlerin performans değerlendirmesinde, *j/f* oranı da önemli bir kriter olarak kabul edilmektedir. Bu oran, ısı transferindeki artışın sürtünme kaybına göre avantajını ifade eder:

$$j/f = \frac{j/j_R}{(f/f_R)^{1/3}} \tag{15}$$

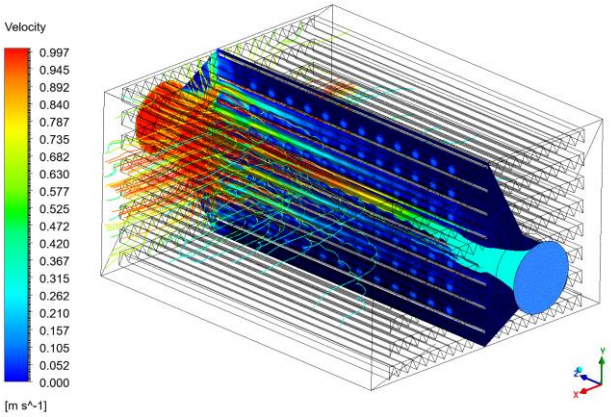
Bu denklemde j_R ve f_R referans yapı için elde edilen değerlerdir. *j/f* oranının yüksek olması, aynı oranda ısı transferi sağlarken daha düşük basınç kaybı anlamına gelmektedir [8]. Bu çalışmada elde edilen tüm boyutsuz

parametreler, ilgili literatür değerleri ile karşılaştırılarak doğrulama yapılmıştır.

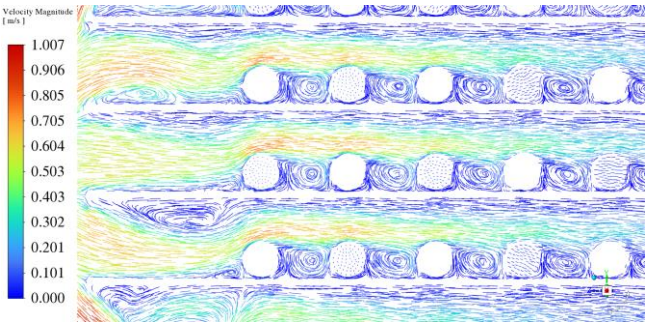
Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada üçgen kesitli kanatçık geometrisine sahip çapraz akışlı su soğutmalı iki farklı ara soğutucu tasarımı için sayısal analiz sonuçları 5 farklı hava hızı için değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen hesaplamalar doğrultusunda farklı hava giriş hızları için elde edilen hız ve sıcaklık dağılım verileri akış yapısı ve ısı taşınım performansları açısından karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Model 1'in termal ve akış analizi



(a)

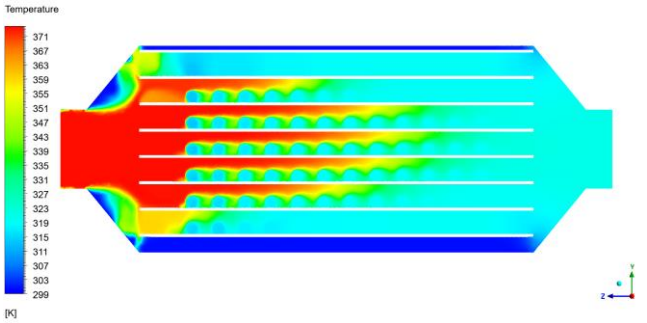


(b)

Şekil 4. Model 1 hava giriş hızı 1m/s iken (a) hız dağılımı (b kesit düzleminde hız vektör alanı

Şekil 4(a)'da, model 1 için 1 m/s hava giriş hızında elde edilen üç boyutlu akış iz çizgileri (streamlines) ve hız dağılımı kontur haritası sunulmaktadır. Bu görselleştirme, akışkanın sistem içindeki hareket yolunu ve hız değişimlerini göstermektedir. Sistem, hava akış yönüne dik olarak konumlandırılmış sıvı soğutma kanallarıyla çapraz akışlı bir düzende çalışmaktadır. Üçgen kesitli kanatçıklar akış yolunda kesit daralmalarına neden olmaktadır. Bu dar bölgelerde yerel hız artışları meydana gelmektedir. Özellikle baypas hatlarında ve çıkışa yakın bölgelerde hava hızının yaklaşık 0.6 m/s seviyelerine ulaştığı gözlemlenmektedir. Bu durum, hava akışının daha düşük hidrolik direnç sunan bölgeleri tercih ettiğini ve sistem içi akış dengesinin kanatçık düzenlemesiyle yönlendirildiğini göstermektedir.

Şekil 4(b)'de ise kesit düzleminde gösterilen hız vektör alanı yer almaktadır. Kanatçıkların arka bölgelerinde düşük hızlı alanlar ve belirgin girdap yapıları oluşmaktadır. Bu durum yerel türbülans seviyesinin artmasına neden olmaktadır. Bu girdap yapıları klasik wake oluşum davranışına ve yerel basınç kayıplarının potansiyel kaynaklarına işaret etmektedir. Akışın kanatçıklar arasında hızlanarak yön değiştirmesi, sistemin türbülans üretme kapasitesini ve dolayısıyla ısı transfer performansını doğrudan etkilemektedir. Ancak bu durum aynı zamanda türbülans kaynaklı basınç kayıplarını da beraberinde getirmektedir [8].

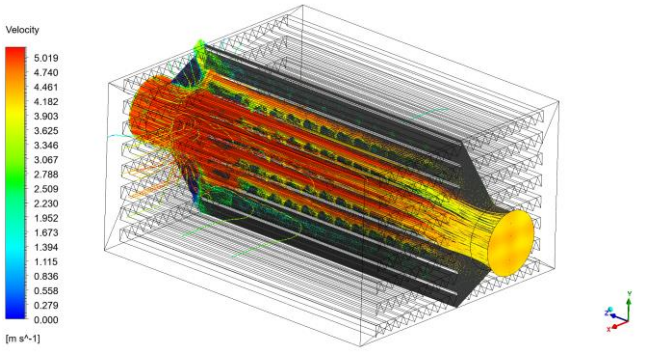


(a)

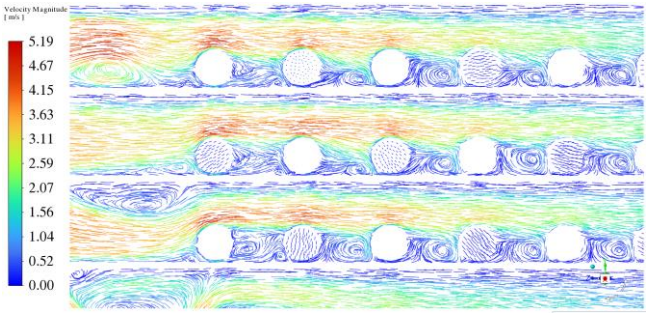
Şekil 5. Model 1 hava giriş hızı 1m/s iken kesit yüzey sıcaklıkları

Şekil 5'te görüldüğü üzere, 1 m/s hızla ve 373 K sıcaklıkla giriş yapan hava, 313 K sıcaklığındaki çapraz akışlı su hattı boyunca ilerledikçe soğumaktadır. Kanatçıkların neden olduğu yön değişimi ve akış içi karışım, ısı transferini artırmakta; özellikle 360 K civarında geçiş bölgeleri oluşmaktadır. Akış çıkışa ulaştığında, hava sıcaklığı yaklaşık 330 K seviyelerine düşmekte ve bu da yaklaşık 40 K'lik bir sıcaklık azalışına karşılık gelmektedir. Şekilde gözlenen kırmızı sıcaklık kuşağının, çıkışa yakın değil, giriş bölgesini yaklaşık 120–180 mm mesafede geçmiş orta bölgelere doğru yönlendiği görülmektedir. Böyle bir sıcaklık yönelimi, sistemdeki hava ve su akışlarının çapraz konumlandırılmasından ileri gelmektedir. Soğutucu sıvı düşey yönde, hava ise yatay düzlemde hareket ettiğinden, oluşan ısıl gradyen yukarı bölgelerde yoğunlaşmaktadır. Bu durum, çapraz akışlı sistemlerde sıcaklık dağılımının iki boyutlu bir karakter göstermesinden kaynaklanmaktadır [31]. Ayrıca, kanatçık aralıklarında gözlemlenen sıcaklık konturlarının düzenliliği, yüzey üzerinden gerçekleşen konveksiyonla ısı transferinin kararlı bir rejimde sürdüğüne işaret etmektedir.

Şekil 6(a)'da, model 1'e 5 m/s hızla giren havanın iz çizgileri ve hız kontur haritası verilmiştir. Hava, 313 K sıcaklığındaki çapraz akışlı su hattı ile soğutulmakta olup, yüksek giriş hızının etkisiyle merkez bölgede hızın 5 m/s seviyelerine ulaştığı gözlemlenmektedir. Kanatçıklar boyunca bölgesel hız gradyenleri oluşmakta ve baypas hatlarında akış yönlenmesi izlenmektedir. Şekil 6(b)'de ise, kesit düzlemindeki hız vektör alanı gösterilmektedir. Kanatçık önünde ve arkasında akışın yön değiştirdiği ve düşük hızlı alanların oluştuğu gözlemlenmektedir. Akış çizgileri simetrik bir yapı sergilemekte ve hız dağılımı genel olarak düzenli ilerlemektedir.

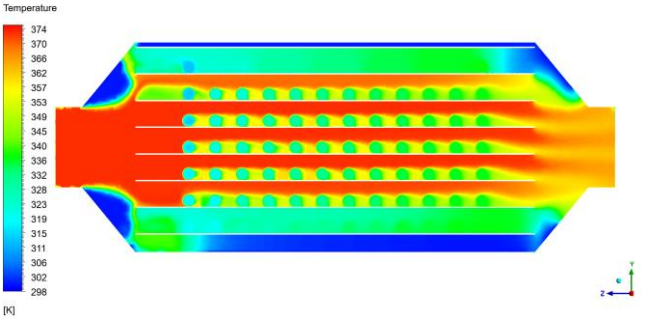


(a)



(b)

Şekil 6. Model 1 hava hızı giriş 5m/s iken (a) iz çizgileriyle üç boyutlu görünüm, (b) kesit düzleminde hız vektör alanı



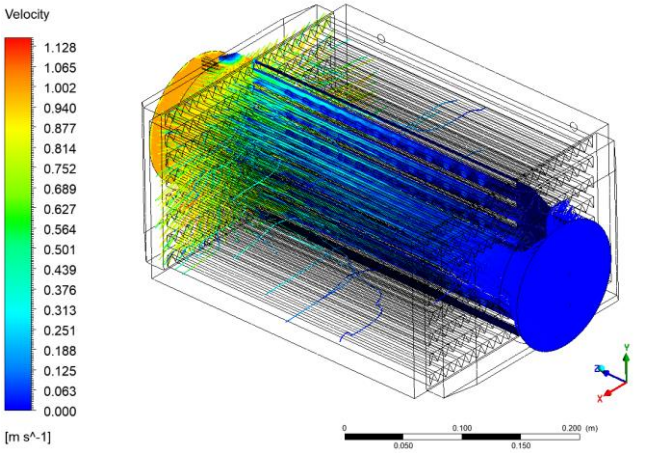
(a)

Şekil 7. Model 1 hava giriş hızı 5m/s iken kesit sıcaklık dağılımı

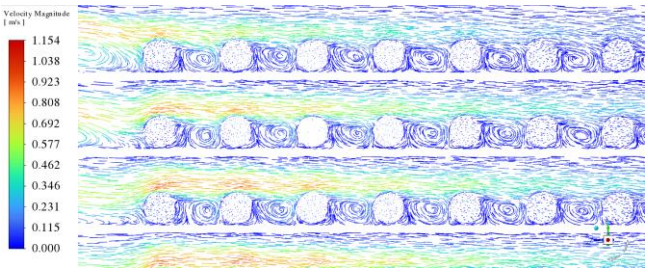
Şekil 7'de, 5 m/s hızla ve 373 K sıcaklıkla giriş yapan havanın, 313 K sıcaklığındaki çapraz akışlı su hattı boyunca ilerleyişine ait sıcaklık dağılımı sunulmaktadır. Giriş bölgesinde sıcaklık dağılımı homojen şekilde yüksek seviyelerde seyretmekte olup, akış ilerledikçe sıcaklık konturlarında belirgin bir azalma gözlemlenmektedir. Özellikle kanal cidarına yakın bölgelerde sıcaklık değerleri yaklaşık 340 K seviyelerine kadar düşmektedir. Ancak akış çıkış bölgesine ulaştığında, sıcaklığın büyük oranda 350 K civarında kaldığı görülmektedir. Kanatçık dizilimi boyunca gelişen ısıl gradyenler, akış yönlendirmesi ve yüzey temasıyla şekillenmekte; konturlar boyunca izlenen düzenli yapı, sistemdeki ısı geçişinin dengeli şekilde sürdüğünü göstermektedir.

Model 2'nin termal ve akış analizi

Model 2'nin hız 1 m/s için elde edilen hız kontur haritaları ve kanatçıkların akış yönlendirme etkisi Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 8(a)'de, giriş havasının çift kademeli bir manifold aracılığıyla içeri alınmasıyla elde edilen hız iz çizgileri sunulmaktadır. Hava, giriş bölümünde daha geniş bir alana yayılmakta ve akışın ilk bölgesinde hız değerleri 1.1 m/s seviyelerine ulaşmaktadır. Akış, giriş bölgesinden itibaren daha dengeli bir şekilde dağılmakta ve boylamsal yönde daha simetrik bir hız alanı gözlemlenmektedir. Baypas hatlarında ve merkez bölgede hız profili daha düzenli ilerlemektedir. Şekil 8(b)'de, kesit düzleminde hava akışına ait hız vektör alanı gösterilmektedir. Akış, kanatçıklar arasında yön değiştirerek ilerlemekte ve arka bölgelerde klasik wake bölgeleri oluşmaktadır. Hız bileşenleri, alt ve üst kanallarda benzer dağılım göstermekte dolayısıyla girdap yapıları simetrik biçimde konumlanmaktadır. Kanatçıklar arası alanlarda hızın 0.8 m/s'yi aştığı bölgelerin olduğu ve düşük hızlı alanların ise genellikle kanatçık arkalarında olduğu anlaşılmaktadır.

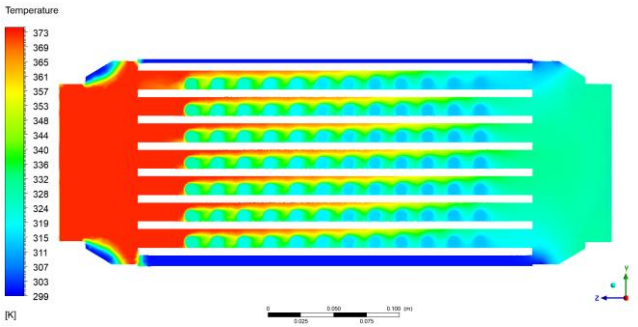


(a)



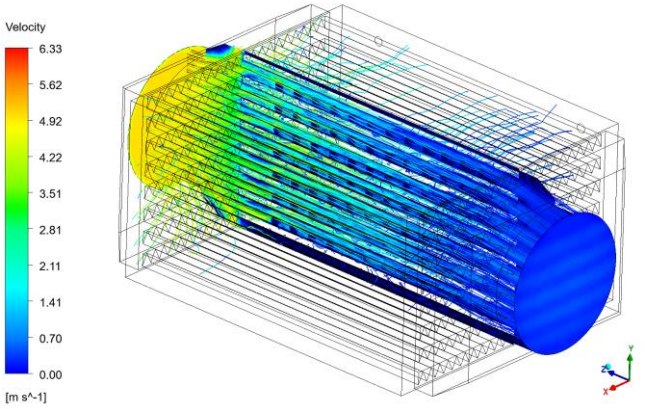
(b)

Şekil 8. Model 2 hava giriş hızı 1m/s iken (a) üç boyutlu hız iz çizgileri (b) kesit görünüşü

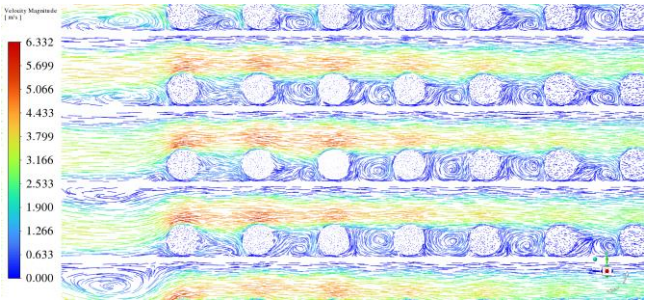


Şekil 9. Model 2 hava giriş hızı 1m/s iken kesit sıcaklık dağılımı

Şekil 9'da, 1 m/s hızla ve 373 K sıcaklıkla giriş yapan havanın, 313 K sıcaklığındaki çapraz akışlı su hattı boyunca ilerleyişine ait sıcaklık dağılımı sunulmaktadır. Giriş bölgesinde sıcaklık dağılımı homojen şekilde yüksek seviyelerde seyretmekte olup, akış ilerledikçe sıcaklık konturlarında düzenli ve kademeli bir azalma gözlemlenmektedir. Özellikle kanal cidarına yakın bölgelerde sıcaklık değerleri 320–330 K aralığına kadar düşmekte; orta bölgelerde ise sıcaklık daha yüksek seviyelerde korunmaktadır. Kanatçıklar arasında gözlemlenen kontur düzeni, sistem genelinde kararlı bir ısı transfer davranışını yansıtmaktadır.



(a)

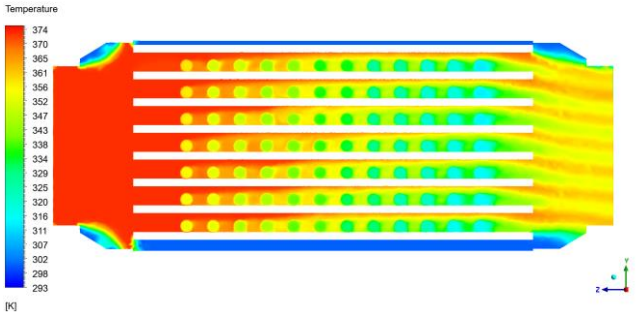


(b)

Şekil 10. Model 2 hava giriş hızı 5m/s iken (a)hız dağılımı b) sıvı ve kanal hattının detay görünüşü

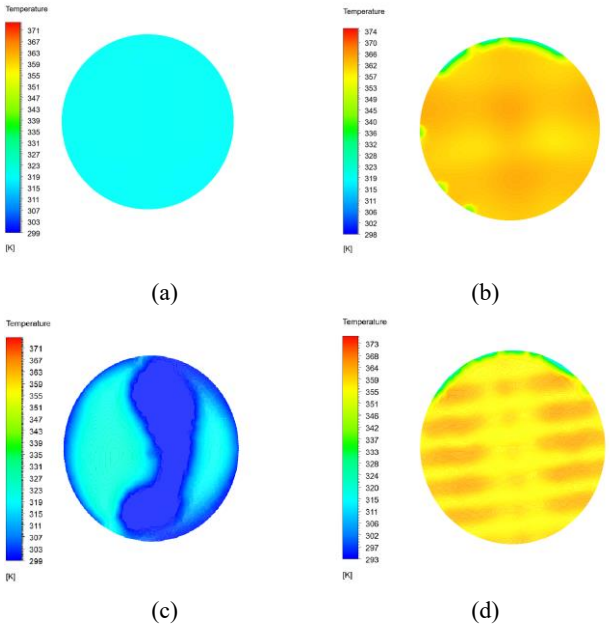
Şekil 10 (a)'da, çift kademeli giriş manifolduna sahip model 2'de, 5 m/s giriş hızında elde edilen hız dağılımı sunulmaktadır. Giriş bölgesinde hava akışı daha geniş bir alana yayılmakta, iz çizgileri boyunca hızın kanal merkezine doğru simetrik şekilde ilerlediği görülmektedir. Akışın ana gövde boyunca yoğunlaştığı bölgelerde hız değerleri 6.3 m/s'ye kadar ulaşmakta; hız dağılımı, kanal içinde daha dengeli bir yapı sergilemektedir. Şekil 10(b)'de, akışın kesit düzlemindeki davranışı sunulmaktadır. Hava, kanatçıklar arasında hızlanarak yön değiştirmekte, arka bölgelerde belirgin wake yapıları oluşmaktadır. Hız büyüklüğü konturlarına göre, kanatçıklar arasındaki akış yollarında 5–6 m/s seviyelerine ulaşan bölgeler tespit edilmiştir. Alt ve üst kanallarda izlenen hız dağılımı, kanatçık dizilimi boyunca akışın düzenli şekilde yönlendirildiğini göstermektedir.

Şekil 11'de, 5 m/s hızla ve 373 K sıcaklıkla giriş yapan havanın, 313 K sıcaklığındaki çapraz akışlı su hattı boyunca ilerleyişine ait sıcaklık dağılımı gösterilmektedir. Giriş bölgesinde sıcaklık yüksek seviyelerde olup, akış ilerledikçe sıcaklık konturlarında kademeli bir azalma gözlemlenmektedir. Çıkış bölgesinde ise, toplam 12 adet sıcaklık hattı ayırt edilebilmekte olup, bunların 7'si 350–360 K aralığında, diğer 5'i ise 340–350 K aralığında konumlanmaktadır. Bu katmanlı yapı, hava akışının kanatçıklardan yönlendirilerek ilerlemesiyle, boru dizilimi çevresinden gelen daha soğuk akış bölgeleri arasında gelişen ısıl geçişi yansıtmaktadır. Hava ve suyun dik eksenlerde hareket etmesiyle oluşan çapraz akış konfigürasyonu, sıcaklık dağılımının hem yatay hem düşey düzlemde iki boyutlu bir karakter göstermesine neden olmaktadır. Kanatçık aralıklarında gözlemlenen kontur düzeni, sistem genelinde kararlı bir ısı transfer yapısına işaret etmektedir.



Şekil 11. Model 2 hava giriş 5m/s iken kesit sıcaklık dağılımı

Şekil 12 (a)'da, model 1 için hava giriş hızının 1 m/s olduğu durumlarda elde edilen çıkış sıcaklık dağılımları sunulmaktadır. 1 m/s hızda, çıkış yüzeyinde homojen ve düşük seviyelerde sıcaklık alanı izlenmekte, buna karşılık Şekil 12 (b)'de 5 m/s hızda sıcaklık dağılımının daha yaygın ve yüksek değerlerde seyrettiği görülmektedir. Şekil 12 (c) ise model 2 için 1 m/s hızda elde edilen çıkış sıcaklık dağılımları gösterilmektedir. 1 m/s hızda, çıkış yüzeyinde merkezden çevreye doğru değişen bir sıcaklık profili oluşmakta; Şekil 12 (d)'de görüleceği üzere 5 m/s hızda belirgin sıcaklık kuşaklarının ortaya çıktığı ve bu yapıların kanal hizasına göre yönlendiği gözlemlenmektedir. Dolayısıyla Model 2'de, giriş geometrisindeki farklılıkların çıkış yüzeyine yansıyan sıcaklık dağılımını doğrudan etkilemektedir.

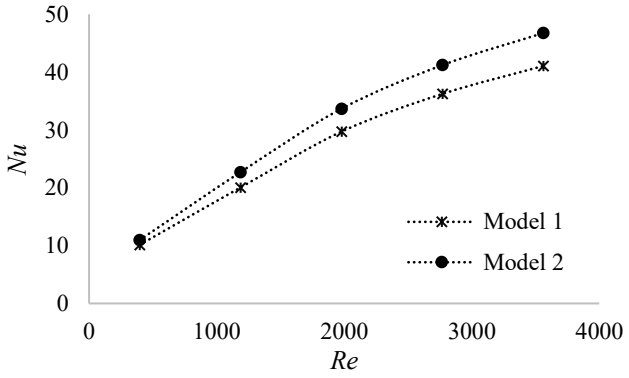


Şekil 12. Manifold çıkış sıcaklık dağılımları (a) model 1 hava giriş hızı 1 m/s (b) model 1 hava giriş hızı 5 m/s (c) model 2 hava giriş hızı 1 m/s (d) model 2 hava giriş hızı 1 m/s 5 m/s

Boyutsuz Sayılar

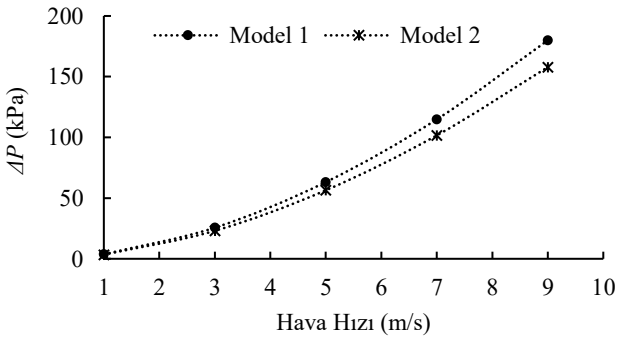
Soğutma performansı ve akış karakteristiklerinin daha kapsamlı değerlendirilmesi amacıyla, farklı hava giriş hızlarında boyutsuz sayılar üzerinden analiz gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, özellikle ΔP, Nusselt (Nu) sayı, Reynolds (Re) ve Colburn j faktörü gibi parametreler hesaplanmış ve model 1 ile model 2'nin karşılaştırmalı performansı sunulmuştur. Analizler, hava giriş hızlarının farklı olduğu 10 senaryo için gerçekleştirilmiştir.

Şekil 13'te, artan Re sayısı ile birlikte her iki model için Nu sayı değerlerinde belirgin bir artış gözlenmektedir. Bu artış, türbülans seviyesinin yükselmesiyle konvektif ısı transferinin güçlendiğini göstermektedir. Model 2, tüm Re aralıklarında Model 1'e kıyasla daha yüksek Nu değerleri sunmuştur. Örneğin Re ≈ 3000 seviyesinde Model 2, yaklaşık %15 daha yüksek Nu değerine ulaşmıştır. Bu performans farkı, Model 2'nin optimize edilmiş yönlendirmeli giriş geometrisi sayesinde akış dağılımını daha homojen hâle getirmesiyle açıklanabilir. Bu sayede yüzeyler arası ısı etkileşimi pozitif yönde artmakta, termal direnç düşmekte ve Nu değerleri yükselmektedir.



Şekil 13. Re sayısına bağlı olarak Nu sayısının Model 1 ve Model 2 için karşılaştırılması

Model 1 ve model 2 için 1, 3, 5, 7 ve 9 m/s hava giriş hızlarında hesaplanan basınç kaybı değerleri Şekil 14'te sunulmaktadır. Her iki modelde de hava hızı arttıkça ΔP artış gözlemlenmekte olup, model 1 ve model 2 arasında oluşan farklar hız arttıkça daha belirgin hale gelmektedir. Veriler, basınç farkının hava hızına karşı logaritmik eğilim gösterdiğini ve model geometrisinin bu değişim üzerinde etkili olduğunu göstermektedir.



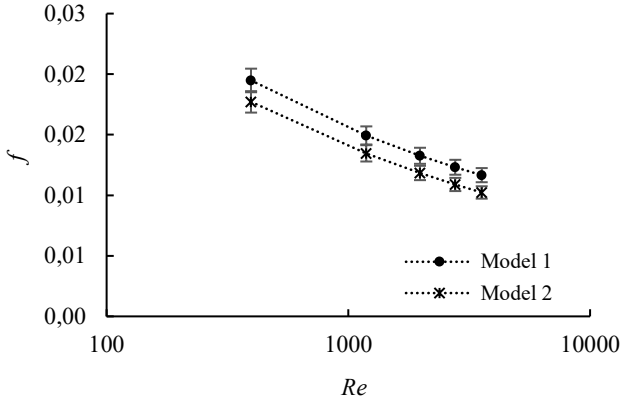
Şekil 14. Model 2'nin model 1'e göre j/f ve ΔP değişiminin yüzdelik karşılaştırması

Tablo 6. Farklı hava giriş hızlarında j/f oranı ve ΔP değişimleri

Hava Hızı (m/s)	***j/f***		***j/f* Değişimi (%)**	***ΔP* Değişimi (%)**
	Model 1	Model 2		
1	0.332	0.397	19.56	-9.14
3	0.3441	0.420	21.98	-9.92
5	0.346	0.431	22.50	-10.30
7	0.345	0.438	26.87	-11.50
9	0.342	0.442	29.40	-12.28

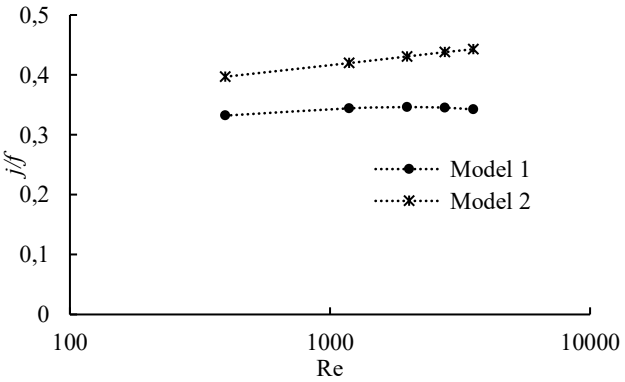
Model 2'nin model 1'e göre performans değişimini göstermek amacıyla farklı hava giriş hızlarında elde edilen j/f oranı değişimi ile ΔP değişimleri Tablo 6'da

sunulmaktadır. *j/f* oranı pozitif yönde artış gösterirken, *ΔP* negatif yönde azalma eğilimi göstermektedir. 5 m/s hava giriş hızı için değerlendirildiğinde, model 2'nin model 1'e kıyasla *j/f* oranında %22.50'lük bir artış, basınç kaybında ise %10.30'luk bir azalma sağladığı görülmektedir. Bu değerler, ısı transfer performansında iyileşme sağlanırken aynı zamanda akış direncinin azaltıldığını göstermektedir. Söz konusu hız değerinde hem termal hem de hidrodinamik açıdan avantaj elde edilmesi, model geometrisindeki değişikliğin sistem verimliliği üzerinde olumlu etkide bulunduğuna işaret etmektedir.



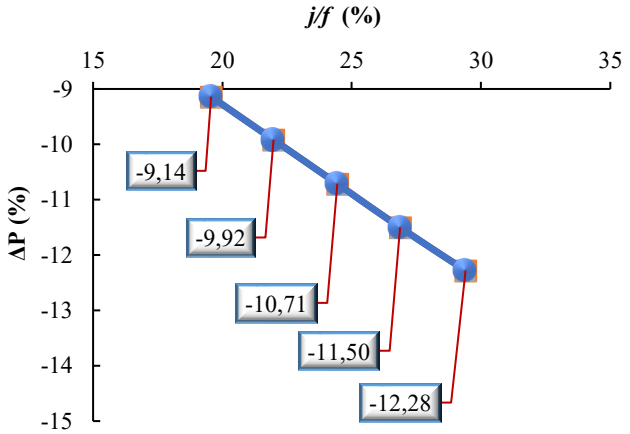
Şekil 15. Boyutsuz akış direnç katsayısı (*f*) dağılımları

Şekil 15'te, boyutsuz akış direnç katsayısı olan *f* ile *Re* arasındaki ilişki sunulmaktadır. Her iki modelde de *Re* sayısının artışıyla birlikte *f* değerinde düşüş gözlenmektedir; bu durum, artan akış hızlarında viskoz etkilerin azalmasına bağlanabilir. Ancak Model 2, tüm *Re* aralıklarında Model 1'e kıyasla daha düşük *f* değerleri göstermiştir. Özellikle düşük *Re* sayısı aralığında (~400–600), Model 2'de elde edilen *f* katsayısı %10–13 oranında daha düşük bulunmuştur. Bu fark, Model 2'nin daha optimize edilmiş giriş geometrisi sayesinde akış üzerindeki sürtünme etkilerini azalttığını ve dolayısıyla toplam basınç kaybını düşürdüğünü göstermektedir.



Şekil 16. *Re* sayısına bağlı olarak ısıl ve hidrolik performans değişimi

Şekil 16'da, *Re* sayısına bağlı olarak hesaplanan *j/f* oranları verilmiştir. Bu oran, sistemin ısıl performansının hidrolik kayıplara oranla ne düzeyde avantaj sağladığını göstermesi açısından kritik bir göstergedir. Model 2, tüm *Re* değerlerinde Model 1'e göre daha yüksek *j/f* oranı sunmuştur. Örneğin, Re ≈ 5000 seviyesinde Model 1 için *j/f* oranı yaklaşık 0.021 iken, Model 2 için bu değer 0.026 düzeyinde ölçülmüştür; bu da yaklaşık %24'lük bir performans artışına işaret etmektedir. Bu sonuç, Model 2'nin hem daha verimli bir ısı transferi sunduğunu hem de bunu daha düşük akış direnciyle gerçekleştirdiğini göstermektedir. Artan *Re* ile birlikte bu avantaj daha belirgin hâle gelmekte, optimize edilmiş çift kademeli giriş yapısının ısıl-hidrolik açıdan sistem performansını artırdığı açıkça ortaya konmaktadır.



Şekil 17. Model 2'nin model 1'e göre j/f ve ΔP değişiminin yüzdelik karşılaştırması

Şekil 17'da, beş farklı hava hızı için Model 2'nin Model 1'e kıyasla sağladığı ısı transfer performansındaki (j/f) artış ile basınç kaybındaki (ΔP) azalma yüzdesel olarak sunulmaktadır. Grafik, hem termal hem de hidrolik parametrelerin birlikte değerlendirilerek performans karşılaştırmasının bütüncül biçimde yapılmasına olanak sağlamaktadır. Hava hızı 1 m/s'den 9 m/s'ye arttıkça, Model 2 tüm senaryolarda j/f oranında artış ve ΔP değerinde düşüş sağlamıştır. Örneğin, 5 m/s hızında, j/f oranında %24,44 artış elde edilirken, ΔP'de %10,71 azalma gözlenmiştir. Bu veriler, çift kademeli giriş yapısına sahip Model 2'nin, yalnızca ısı transfer kapasitesini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda akışa karşı oluşan direnci azaltarak sistemin enerji verimliliğini optimize ettiğini göstermektedir. Artan Re sayısına rağmen f değerinde gözlenen azalma eğilimi, Model 2'nin akış yönlendirmede daha etkin olduğunu kanıtlamakta ve hidrodinamik kayıpların minimize edildiğini göstermektedir. Bu sonuçlar, giriş manifoldundaki geometrik düzenlemelerin, ara soğutucu performansı üzerindeki kritik rolünü açık biçimde ortaya koymaktadır.

Sonuç

Bu çalışma kapsamında, hidrojen yakıt hücreli taşıtlarda kullanılmak üzere geliştirilen bir ara soğutucu sisteminin enerji verimliliği açısından termal ve hidrodinamik performansı sayısal yöntemlerle analiz edilmiştir. İncelemede hava giriş hızları 1 ila 9 m/s aralığında değiştirilerek testler gerçekleştirilmiştir. Enerji transferi, sabit sıcaklıkta çalışan çapraz akışlı bir su hattı aracılığıyla modellenmiştir. İki farklı giriş yapısı karşılaştırılmıştır:

Model 1'de tek kademeli klasik bir giriş kullanılmış, Model 2'de ise hava dağılımını daha homojen hale getirmek amacıyla çift kademeli bir yapı tercih edilmiştir.

Bu çalışma, hidrojen yakıt hücreli sistemlerde ara soğutucu tasarımında manifold giriş geometrisinin kritik önemini ortaya koymuştur. Çift kademeli giriş yapısına sahip model 2, tek kademeli model 1'e kıyasla %22.50 daha yüksek *j/f* oranı ve %10.30 daha düşük basınç kaybı sağlamıştır. Kanatçık ve boru hizasında oluşan sıcaklık geçişleri, enerji geçişinin hem dikey hem yatay düzlemde optimize edildiğini göstermektedir.

Yapılan analizlerde hesaplanan *Nu* sayıları, hava giriş hızına bağlı olarak artış göstermiş ve bu artış özellikle Model 2 tasarımı için daha belirgin hale gelmiştir. *Re* sayısının yaklaşık 3000 olduğu bölgede, Model 2'nin elde ettiği *Nu* değeri, Model 1'e kıyasla %15 oranında daha yüksek bulunmuştur. Bu bulgu, çift kademeli giriş geometrisinin sadece akış düzgünlüğünü artırmakla kalmayıp, aynı zamanda ısı transfer yüzeyleri üzerindeki konvektif etkileşimi optimize ettiğini ortaya koymaktadır. Yüzeyler arası ısı geçişinin güçlenmesi, sistemin toplam ısıl direncini azaltarak daha etkin bir soğutma performansı sağlamaktadır. Sonuç olarak, Model 2'nin yüksek *Nu* değerlerine ulaşması, yalnızca *j/f* oranındaki artışla değil, aynı zamanda ısı transferinin mutlak kapasitesinde de iyileşme sağladığını doğrulamaktadır. Bu durum, giriş geometrisinin optimize edilmesinin hem boyutsuz performans parametreleri hem de sistem düzeyindeki ısı transferi açısından kritik bir tasarım kriteri olduğunu açıkça göstermektedir.

Sonuç olarak, manifold giriş geometrisinde yapılan yapısal düzenlemelerin, sistemin genel enerji performansı üzerinde önemli bir iyileşme sağladığı görülmektedir. Bu bulgular, enerji sistemleri kapsamında geliştirilecek yeni nesil ara soğutucu tasarımlarında sayısal analizlerin yol gösterici bir araç olduğunu ortaya koymaktadır.

Kaynakça

[1] Akyuz, E., Tezer, T. (2025). Techno-economic feasibility and regression analysis of green hydrogen production from solar and wind energy in Türkiye. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 142, 27 June 2025, pp. 1184-1195, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.02.151

[2] Y. Xiong, F. Wang, D. Zhao, X. Sun, F. Ren, M. Zhao, J. Hao, Y. Wu, S. Zhang, "Cradle-to-gate GHG emissions and decarbonization potentials of minivan-equipped hydrogen fuel cell system, "*Resources, Conservation and Recycling*, vol. 212, no. 107877, Jan. 2025 https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107877.

[3] T. M. Navinkumar, C. Bharatiraja, "Sustainable hydrogen energy fuel cell electric vehicles: A critical review of system components and innovative development recommendations," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 215, no. 115601, June 2025. https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115601.

[4] M. Genovese, D. Blekhman, M. Dray, P. Fragiacomo, "Improving chiller performance and energy efficiency in hydrogen station operation by tuning the auxiliary cooling" *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 4, pp. 2532-2546, Jan. 2022. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.156

[5] Y. Zhou, J. Kang, B. Chen, W. Zheng, C. Zhang, P. Ming, F. Pan, J. Wang, B. Li, "Formation mechanism and morphology control of cracks in PEMFC catalyst layer during fabrication process: A review," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 340, no. 103468, June 2025. https://doi.org/10.1016/j.cis.2025.103468

[6] P. K. Thiyagarajan, N. K. Gokuldas, G. Srinavasa, A. K. Rajendran, K. S. Saravanakumar, M. Vasudevan, M. Kannan, C. Durga Prasad, A. A. Aden, "Investigating the Combinations of Operating Parameters of PEMFC Computational Results Using the Taguchi Method," *International Journal of Thermofluids*, vol. 27, no. 101162, May 2025. https://doi.org/10.1016/j.ijft.2025.101162

[7] W. Li, Y. Wang, P. Zhou, F. He, S. Gao, C. Li, "Simulation analysis of BOP thermal management system for hydrogen fuel cell bus," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 190, no. part B pp. 264-275, Oct. 2024. https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.08.046

[8] C. Yu, W. Zhang, X. Xue, J. Lou, G. Lao, "Analysis of water-cooled thermal characteristics," *Energies*, vol. 14 (24), no. 8332, Dec. 2021. https://doi.org/10.3390/en14248332

[9] Y. Li, Z. Hu, Y. Zhang, J. Li, L. Xu, M. Ouyang, "Optimal performance and preliminary parameter matching for hydrogen fuel cell powertrain system of electric aircraft," *eTransportation*, 21, 100342, Sept. 2024. https://doi.org/10.1016/j.etran.2024.100342.

[10] Kilic, G. A. (2025). Performance Evaluation of Triply Periodic Minimal Surface Heat Exchangers Using Nanofluids at High Flow Rates for Enhanced Energy Efficiency. *Applied Sciences*, *15*(8), 4140.

[11] Gül, M., Akyüz, E. (2023). Techno-economic viability and future price projections of photovoltaic-powered green hydrogen production in strategic regions of Turkey. Journal of cleaner production, 430, 139627.

[12] F. Zhang, B. Zu, B. Wang, Z. Qin, J. Yao, Z. Wang, F. Linhao, K. Jiao, "Developing long-durability proton-exchange membrane fuel cells," *Joule*, vol. 9, no. 3, 101853, March 2025. https://doi.org/10.1016/j.joule.2025.101853.

[13] Y. Zhang, Z. Xiao, X. Zhao, J. Wang, Y. Wang, J. Yu, "Experimental and Simulation Study of Proton Exchange Membrane Fuel Cell with 12 μm Thick Membrane over the Temperature Range of 80° C to 120° C," *Membranes*, vol. 15(3), no. 72, Feb. 2025. https://doi.org/10.3390/membranes15030072.

[14] J. Tian, M. S. Ismail, D. Ingham, K. J. Hughes, L. Ma, M. Pourkashanian, "Multiphase, three-dimensional PEM fuel cell numerical model with a variable cross-sectional area flow channel," *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, vol. *33*(8), pp. 2778-2799, June 2023. https://doi.org/10.1108/HFF-02-2023-0075.

[15] S. Y. Kim, H. K. Cho, "Turbulence model assessment and heat transfer phenomena inside a rectangular channel under forced and mixed convection," *International Journal*

of Heat and Mass Transfer, vol. 185, no. 122388, Apr. 2022. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122388.

[16] R. Kaiser, C. Y. Ahn, Y. H. Kim, J. C. Park, "Performance and mass transfer evaluation of PEM fuel cells with straight and wavy parallel flow channels of various wavelengths using CFD simulation," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 51, pp. 1326-1344, Jan. 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.025.

[17] H. Djemel, S. Chtourou, M. Baccar, "Three-dimensional numerical study of a new intercooler design," *International Journal of Thermofluids*, vol. 17, no. 100263, Feb. 2023. https://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100263.

[18] C. Q. Duong, P. X. Pham, T. D. Luong, "Experimental and Theoretical Investigations of a Plate-Fin Water Intercooler Equipped in a Boosted Diesel Engine," *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 145(2), no. 022902, Nov. 2022. https://doi.org/10.1115/1.4056142.

[19] Q. Zhang, S. Qin, R. Ma, "Simulation and experimental investigation of the wavy fin-and-tube intercooler," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 8, pp. 32-40, Sept. 2016. https://doi.org/10.1016/j.csite.2016.04.003.

[20] A. C. Patrao, I. Jonsson, C. Xisto, A. Lundbladh, T. Grönstedt, "Compact heat exchangers for hydrogen-fueled aero engine intercooling and recuperation," *Applied Thermal Engineering*, vol. 243, no. 122538, Apr. 2024 https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122538.

[21] S. M. Baek, S. H. Yu, J. H. Nam, C. J. Kim, "A numerical study on uniform cooling of large-scale PEMFCs with different coolant flow field designs," *Applied Thermal Engineering*, vol. 31(8-9), no. 8-9, pp. 1427-1434, June 2011. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.01.009.

[22] G. Zhang, Z. Qu, W. Q. Tao, X. Wang, L. Wu, S. Wu, X. Xie, C. Tongsh, W. Huo, Z. Bao, K. Jiao, Y. Wang, "Porous flow field for next-generation proton exchange membrane fuel cells: materials, characterization, design, and challenges," *Chemical Reviews*, vol. 123(3), no. 3, pp. 989-1039, Dec. 2022. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00539.

[23] ANSYS Inc, *ANSYS Fluent 2023 R2 User's Guide*, 2023. ANSYS Inc.

[24] Kilic, G. A. (2023). An experimental analysis on the effects of passive liquid cooling system on thermal management system. *International Journal of Thermofluids*, *18*, 100370. https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100370.

[25] Incropera, F.P., DeWitt, D.P., Bergman, T.L., Lavine, A.S., 2007. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th ed. John Wiley & Sons, New York.

[26] G.A. Kilic, E. Yalcin, A.A. Aydin (2019). Optimum operating temperature range of phase change materials used in cold storage applications: A case study. In *Environmentally-benign energy solutions*, pp. 711-726. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20637-6_35.

[27] M. Z. Saghir, G. A. Kilic, "Experimental Forced Convection Study Using a Triply Periodic Minimal Surface Porous Structure with a Nanofluid: Comparison with Numerical Modeling," *Applied Sciences*, vol. 14(17), no. 7594, Aug. 2024. https://doi.org/10.3390/app14177594.

[28] X. Tang, Q. Shi, Z. Li, S. Xu, M. Li, "Research on the influence of the guide vane on the performances of intercooler based on the end-to-end predication model," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 192, no.122903, Aug 2022. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122903.

[29] S. Kakac, R. K. Shah, W. Aung, *Handbook of single-phase convective heat transfer*, 1987.

[30] R. L. Webb, N. H. Kim, "Principles of Enhanced Heat Transfer," *Journal of Enhanced Heat Transfer*, vol. 17, no. 4, pp. 293–300, 2010.

[31] R. M. Manglik, A. E. Bergles, "Heat transfer and pressure drop correlations for twisted-tape inserts in isothermal tubes: Part II—Transition and turbulent flows," *Journal of Heat Transfer*, vol. 117, no. 3, pp. 526–528, Nov. 1993. https://doi.org/10.1115/1.2911384.

[32] J. Dong, J. Chen, Y. Chen, Y. Zhou, "Heat transfer and pressure drop correlations for the multi-louvered fin compact heat exchangers," *Energy Conversion and Management*, vol. 48, no. 5, pp. 1506–1515, May 2007. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.11.023.

[33] H. Atalay, M. T. Çoban, "Modeling of cross flow air-gas heat exchanger using finite difference method," *Journal of Polytechnic*, vol. 21(1), pp. 155-163, March 2018. https://doi.org/10.2339/politeknik.389585.

[34] A. Ali, M. Houda, A. Waqar, M.B. Khan, A. O. Deifalla (2024). A review on application of hydrogen in gas turbines with intercooler adjustments. *Results in Engineering*, 101979. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101979.

[35] A. Kibishov, G. A. Kilic, N. Rustamov, N. Genc, "Thermal Analysis of Radiation Heat Transfer of Improved Fractal Solar Collectors," *Applied Sciences*, vol. 14(23), no. 11155, Nov. 2024. https://doi.org/10.3390/app142311155.

Dicle University
Journal of Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/dumf
duje.dicle.edu.tr

Research Article

Investigation of dewatering of chromite tailings with lignin

Hasan Ali TANER[1*]

[1] Konya Technical University, Mining Engineering Department, hataner@ktun.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-9368-8902

ARTICLE INFO

Article history:

Received 20 January 2025
Received in revised form 3 March 2025
Accepted 4 March 2025
Available online 30 June 2025

Keywords:

Chromite, tailings, flocculation, lignin, turbidity

DOI: 10.24012/dumf.1623538

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

Every year, a large amount of chrome ore is produced in our country. Dewatering of tailings generated during the beneficiation of these ores is one of the problems faced by the mineral processing industry. In this study, flocculation performance was investigated by using lignin in the dewatering of tailings obtained from chrome ore beneficiation. The sample used in the study was obtained from Burdur Yesilova chrome ore beneficiation plant tailings dam. The effects of flocculant dosage, stirring speed, pulp density and suspension pH value on turbidity were investigated. Experimental results using lignin showed that the optimum turbidity value was 24.4 NTU. Flocculation experiments showed that the optimal flocculation conditions were as follows: flocculant dosage of 50 g/t, stirring speed of 250 rpm, pulp density of 15% and pH 9.2. This study is important in terms of being carried out using tailings from actively operating chrome ore beneficiation plant and determining the flocculation properties of the tailings. By carrying out this study, it has been shown that dewatering these tailings can be done in an effective and environmentally friendly way in order to combat water scarcity and supply clean water for reuse in the plant.

Introduction

Chrome is one of the most widely used metals in various industries. Chromite mineral, the main source of chrome, is an essential raw material for the production of stainless steel, ferrochrome alloys, refractories and chemicals [1]. In chrome mining, which is a significant industry for Turkey, 1.5 million tons of chrome ore were produced in 2023 [2]. The production of high-grade concentrates (Cr_2O_3>45wt%) from low-grade ores is carried out in chrome ore beneficiation plants.

In these plants, large quantities of tailings are produced by processing low-grade ores and before these tailings are sent to tailings pools, solid-liquid separation methods must be applied. The suspension consisting of fine-sized particles and water should be subjected to dewatering. Because there is a significant need for clean water in ore enrichment plants and therefore, water recovery is crucial for the sustainable plants.

It is impossible for the particles in the suspension to settle spontaneously in a short time. Therefore, the flocculation process is necessary [3]. Flocculation is a widely used technique in many industrial applications to facilitate the solid-liquid separation process [4]. It allows suspended particles to come together and reach a size where they can settle with the help of gravity. High settling rates and low turbidity are desired outcomes of flocculation. Flocculation is a complex process and flocculant type and dosage, suspension pH, particle size, molecular weight and stirring conditions are the main factors affecting floc properties, settling rate and turbidity value [3, 5].

There are a wide variety of polymeric flocculants used in dewatering processes. Synthetic flocculants have attracted considerable interest due to their low required dosages, easy handling process, ability to form strong and large solid aggregates, and to easily remove flocs from wastewater. Nevertheless, synthetic flocculants are typically not environmentally friendly as they are not biodegradable and their by-products may release monomers that may have carcinogenic effects [4, 6]. Organic biopolymer-based flocculants, and especially lignin-based flocculants, are increasingly gaining attention as raw materials with low cost and biodegradable potential. Natural polymers such as starch, chitosan, guar gum, sodium alginate, cellulose and microbial flocculants have also been widely used as for this purpose [7–13].

Lignin, which can be recycled from bioethanol and paper production waste, is among the largest renewable resources. However, studies and practical applications for the sustainable utilization of lignin are extremely limited, with most of them focusing on its combustion for energy generation [14]. The physicochemical advantages of lignin include (a) being rich in functional groups, (b) high adsorption capacity, and (c) strong potential for the production of value-added products [15]. Its renewable,

non-toxic, and biodegradable nature allows lignin to be effectively used in producing environmentally friendly materials [16]. Three types of lignin can be extracted from pulping black liquor: lignosulfonate, kraft lignin, and organic solvent lignin. Among these, kraft lignin is the most commonly used [14].

In a study on the flocculation characteristics of tailings from the beneficiation of chrome ore, it was observed that there was no change in the sedimentation rate of nonionic type flocculant with increasing dosage, but the sedimentation rate of anionic and cationic flocculants was directly proportional to the dosage and ionicity had a significant effect on the flocculation rate. It was also determined that low molecular weight anionic flocculants improved flocculation properties, while cationic flocculants performed better at higher molecular weight and nonionic flocculant did not show any flocculation effect [17].

The tailings formed in chrome ore beneficiation plants generally contain clays and also have some difficulties in dewatering due to their colloidal size and amorphous structure. On the other hand, while there are few studies in the world on the dewatering of these tailings [17, 18], no studies have been found in our country. The aim of this study is to determine the optimal conditions according to the sedimentation behavior of chrome ore beneficiation plant tailings using lignin as natural flocculant.

Material and Methods

Material

In this study, a sample taken from the tailings pool of Burdur Yeşilova chrome ore beneficiation plant was used. After the crushing process in the plant, the ore under 0.6 mm is fed to the hydrosizer and the different fractions formed are enriched on different shaking tables. All tailings obtained from the tables are sent to the tailings dam. The clean water obtained is reused in the plant. Mineralogical and chemical analyses were carried out to determine the characteristic properties of the sample. Particle size distribution was examined by wet sieving, mineral compositions by X-ray diffraction (XRD) and chemical content by X-ray fluorescence (XRF). According to the particle size distribution, it was determined that 80% of the sample was finer than 280 µm. XRD analysis results revealed that gangue minerals such as quartzite, lizardite and pyrrhotite were present together with chromite. The chemical analysis results are presented in Table 1. The sample contains 1.57% chromite, and as expected, the tailings are primarily composed of SiO_2 and MgO.

Kraft lignin, used as a flocculant in this study, is an anionic type flocculant. Kraft lignin is typically a heterogeneous polymer with a wide molecular weight distribution and chemical structure is given in Fig. 1 obtained from Sigma Aldrich. As seen in Fig. 1, it contains phenolic, carbonyl, carboxylic, aliphatic hydroxyl groups and methoxy groups. Prior to the experiments, lignin was prepared at a concentration of 0.1%, in a volume of 50 mL and stirred for 1 hour using a magnetic stirrer. While pure water was used for the preparation of the reagent, tap water was used in the experiments. Analytical grade NaOH and HCl were used for pH adjustment. All experiments were carried out at room temperature. The sample density was determined to be 2.49 g/cm^3 using a pycnometer.

Table 1. Chemical analysis results of the sample

Components	Amount, %
Cr_2O_3	1.57
SiO_2	38.30
Al_2O_3	0.36
CaO	0.36
Fe_2O_3	6.72
MgO	34.60
SO_3	0.05
NiO	0.30
ZrO_2	0.29
LOI*	16.95

*LOI: Loss-on-ignition

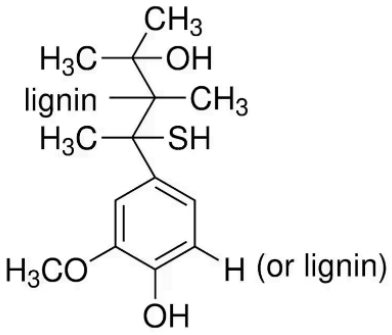


Figure 1. Kraft lignin chemical structure

Method

Flocculation experiments were carried out in a glass beaker with a volume of 400 mL using various pulp densities. First, suspension was stirred for 5 min and at 1750 rpm using a mechanical stirrer to ensure homogeneity. Subsequently, the stirring speed was reduced, and flocculant was added to the suspension. After the addition, the shear effect was slowly reduced and kept at a slow speed. The suspension was allowed to settle for 3.5 min. Turbidity was determined by taking 10 mL of supernatant from a certain distance below the air-water interface. The general flow chart of flocculation experiments was given in Fig. 2.

The effects of flocculant dosage, stirring speed, pulp density and pH parameters were investigated by considering the turbidity values of the suspension. Experimental parameters and their levels are given in Table 2. In order to see the repeatability of the flocculation test, each experiment was repeated twice and the average results were recorded.

Table 2. Experimental conditions

Variables	Levels
Flocculant dosage (g/t)	50, 100, 200, 300, 400, 500
Stirring speed (rpm)	100, 250, 500, 750
Pulp density (%)	2.5, 5, 10, 15, 20
pH	5, 7, 9.2, 11

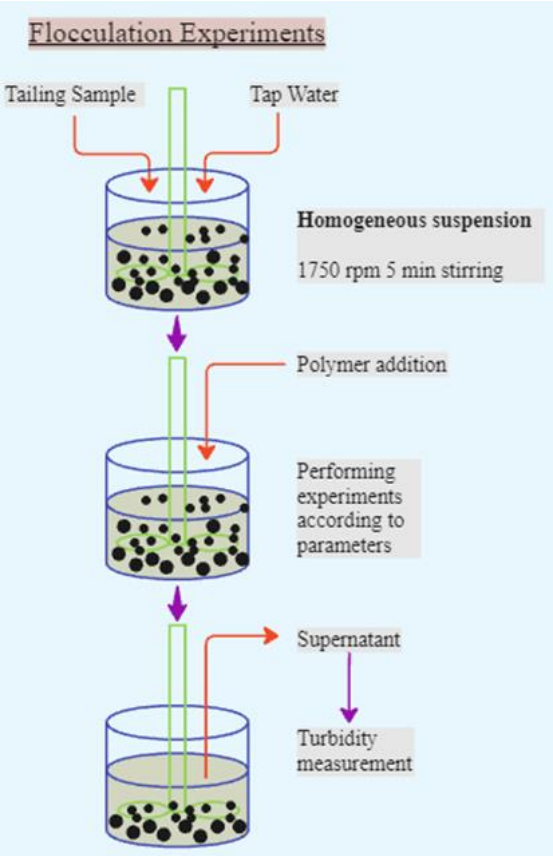


Figure 2. Flow chart of flocculation experiments

Results and Discussions

Natural settling behaviour of sample

In order to determine the free settling behavior, the sample was stirred at a pulp density of 5% in a 500 mL beaker and a stirring speed of 1750 rpm for 15 min. The pulp was transferred into a graduated cylinder and inverted twice to ensure uniform dispersion. Free settling was monitored by observing the solid-liquid interface and measuring the interface height at 15 sec intervals. The time-dependent interface height is presented in Fig. 3. When the settling behavior of the sample was examined, the settling rate was high in the 4 min, but after this period the settling rate slowed down considerably. A rapid settling time can make the dewatering process more efficient.

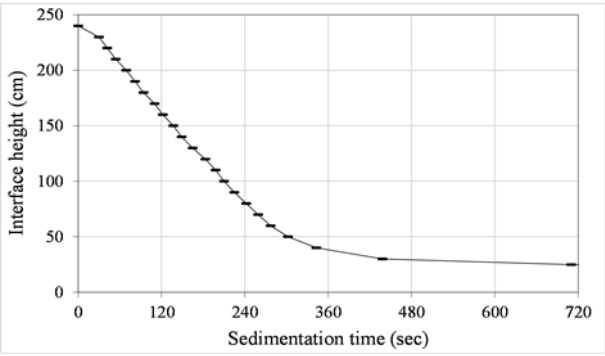


Figure 3. Time-dependent interface height change

Flocculation experiments with lignin

Flocculation experiments were performed to investigate the effects of flocculant dosage, stirring speed, pulp density, and pH on the turbidity of the supernatant. The results are summarized in Fig. 4. When Fig. 4a was examined depending on the lignin dosage at natural pH, the optimal turbidity value was obtained as 71.4 NTU at a dosage of 50 g/t. While similar turbidity values were obtained at 100-300 g/t dosages, a notable increase in turbidity was observed at 500 g/t. At lower dosages, sufficient bridging between particles occurred; however, at high dosage (500 g/t), bridging was prevented and turbidity increased due to the lack of a suitable place for adhesion. As a result, overdosage reduced the stability of the suspension. Organic polymeric flocculants can replace inorganic salt form coagulants by showing high performance at lower dosages [18]. However, compared to synthetic organic polymers, bio-based polymers are effective at high dosage [19].

The stirring speed is crucial in the flocculation process, influencing floc formation, size, strength, and settling rate. Fig. 4b shows the turbidity change of the suspension depending on the stirring speed. While the optimal stirring speed was determined as 250 rpm, lower speeds prevented sufficient particle-flocculant interaction. In addition, it causes difficulties in applying the bridging effect of the flocculant, resulting in high turbidity values. At low stirring intensity, the contact among the particle surfaces and polymer is insufficient, which can lead to excessive polymer consumption and result in poor flocculation performance [3]. The stirring speed is important in shearing or breaking the formed flocs [6, 20].

There is an optimum pulp density in which the maximum flocculation rate is achieved. Fig. 4c shows the results of suspension at pulp densities of 2.5-20wt%. Turbidity decreased by 69 NTU as the pulp density increased from 2.5% to 15%. When the pulp density increased to 20%, it became difficult to distribute the reagent evenly in the suspension and therefore the turbidity value increased. High pulp density resulted in higher collision efficiency between particles [21] and hence increased flocculation rate by up to 15%. Excessively high-density pulp causes high viscosity, making stirring inefficient and increasing shear stress, which causes flocs to break down.

The pH value of the suspension has a great influence on the flocculation efficiency, especially for ionic flocculants. To investigate the effect of pH, experiments were carried out at different pH values and the results are given in Fig. 4d. The lowest turbidity value of 24.4 NTU was obtained at the natural pH (9.2). Higher turbidity values were observed at a suspension pH of 5. It has been stated that the reason for this is that lignin loses its stability easily in acidic media [14]. Additionally, the strength of flocs has been reported to decrease with decreasing pH value [22]. The natural pH of the sample is 9.2, which means that there are more OH^- ions in the suspension. Therefore, the solid surface has a positive charge. Since kraft lignin is an anionic type flocculant, flocculation occurs due to the presence of electrostatic attraction forces.

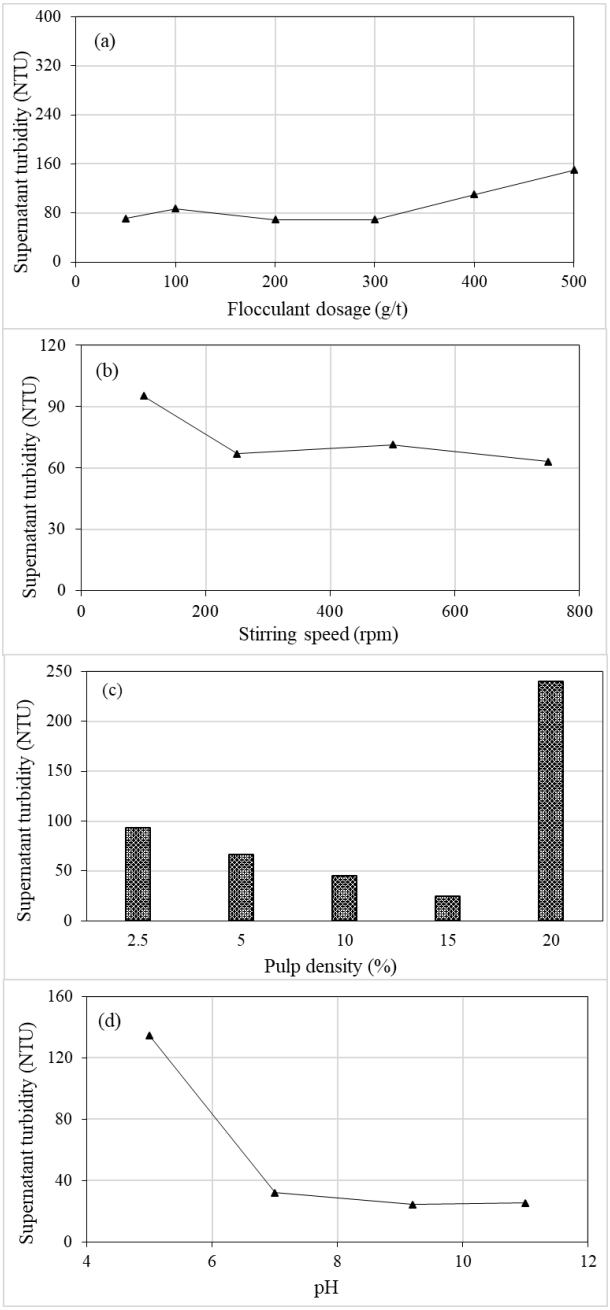


Figure 4. Effects of flocculant dosage (a), stirring speed (b), pulp density (c) and pH (d) on turbidity with lignin

To determine the natural settling behavior of the tailing in the presence of lignin, the pulp was stirred in a 500 mL beaker, at 5% pulp density and 1750 rpm stirring speed for 15 min. The stirring speed was reduced to 250 rpm and 50 g/t flocculant dosage was added. After conditioning for 1 min, the pulp was transferred from the beaker to the graduated cylinder and inverted twice to ensure good dispersion. Fig. 5 shows the time-dependent interface height variation under optimum flocculant conditions. Under this condition, a distinct interface was formed between the flocculated tailing and the supernatant. The settling rate increased in the case of using optimum condition with lignin in comparison with the natural settling rate of the tailing given in Fig. 3. During natural settling, the sedimentation rate was slower. With the use of lignin, the interface height was further reduced from 20 mm to 13 mm. Clarification of the tailing was also achieved in 3 min with lignin compared to the natural settling time of approximately 6 min.

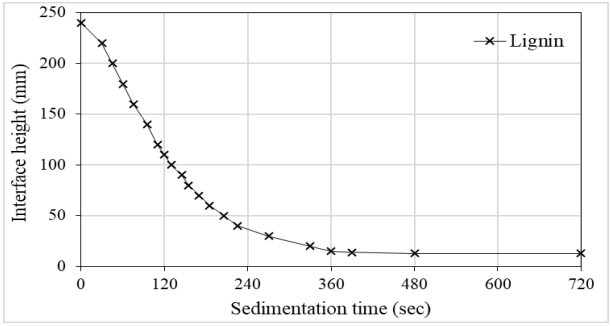


Figure 5. Time-dependent interface height change

In general, lignin-based flocculants are regarded as safe, non-toxic, completely biodegradable and environmentally friendly. However, compared to currently used synthetic polymer flocculants, the charge density of lignin-based flocculants is generally small, resulting in lower flocculation efficiency [14, 23]. To improve flocculation performance, modification of lignin is necessary to obtain new functional groups and increase both its charge density and molecular weight. Biodegradable flocculants are beneficial for environmental protection and meet the needs of today's green sustainable development.

Conclusions

In this study, the feasibility and effectiveness of using lignin as a flocculant for dewatering tailings from a chrome ore beneficiation plant was investigated. Mineralogical composition of the tailings was determined to contain chromite, quartz, lizardite and pyrrhotite. Lignin used at low dosage was found to be an effective flocculant in obtaining low turbidity. It was found that both pulp density and suspension pH have a direct effect on flocculation performance. Flocculation was more effective under basic conditions, while acidic environments resulted in higher turbidity.

Optimal flocculation was achieved with a turbidity of 24.4 NTU using 50 g/t lignin, 250 rpm stirring, 15% pulp density, and pH 9.2. Lower turbidity values mean that the supernatant is clearer and contains fewer fine particles after flocculation. Lignin considerably decreased the supernatant turbidity of the suspension through the bridging mechanism. In chrome ore beneficiation plants, a large amount of water is generally used. Efficient dewatering is essential for water recycling and sustainable plant operations. In addition, the use of organic lignin as a flocculant in dewatering would be a good approach for resource conservation, low carbon footprint and green mining.

Conflict of Interest Statement

"There is no conflict of interest with any person / institution in the article prepared."

References

[1] S. K. Das, "Quantitative mineralogical characterization of chrome ore beneficiation plant tailing and its beneficiated products," *Int. J. Min. Met. Mater.,* vol. 22, pp. 335–345, Apr. 2015, doi:10.1007/s12613-015-1078-y.

[2] İstanbul Maden İhracatçıları Birliği (İ.M.İ.B.) (2023). "2023 Yılı Maden Sektörü Görünümü Raporu."

[3] B. Amarjargal and T. Taşdemir, "Improving flocculation performance of copper flotation tailings by conventional and new technology polymers*," Water Air Soil Pollut.,* vol. 234, no. 67, Jan. 2023, doi.org/10.1007/s11270-023-06088-z.

[4] V. H. Dao, N. R. Cameron, and K. Saito, "Synthesis, properties and performance of organic polymers employed in flocculation applications," *Polym. Chem.,* vol. 7, no. 1, pp. 11–25, 2016, doi:10.1039/C5PY01572C.

[5] V. Onen, P. Beyazyuz, and E. Yel, "Removal of turbidity from travertine processing wastewaters by coagulants flocculants and natural materials," *Mine Water Environ.,* vol. 37, pp. 482–492, 2018, doi.org/10. 1007/s10230- 017-0499-4.

[6] A. Khazaie, M. Mazarji, B. Samali, D. Osborne, T. Minkina, S. Sushkova, S. Mandzhiev, and A. Soldatov, "A review on coagulation/flocculation in dewatering of coal slurry," *Water,* vol. 14, no. 918, 2022, doi.org/10.3390/w14060918.

[7] E. Assaad, A. Azzouz, D. Nistor, A. V. Ursu, T. Sajin, D. N. Miron, F. Monette, P. Niquette, and R. Hausler, "Metal removal through synergic coagulation-flocculation using an optimized chitosan – montmorillonite system," *Appl. Clay Sci.,* vol. 37, pp. 258–274, 2007, doi.org/10.1016/j.clay.2007.02.007.

[8] M. D. Machado, M. S. F. Santos, C. Gouveia, H. M. V. M. Soares, and E. V. Soares, "Removal of heavy metals using a brewer's yeast strain of Saccharomyces cerevisiae: the flocculation as a separation process," *Bioresour. Technol.,* vol. 99, pp. 2107–2115, 2008, doi.org/10.1016/j.biortech.2007.05.047.

[9] M. C. Garcia, A. A. Szogi, M. B. Vanotti, J. P. Chastain, and P. D. Millner, "Enhanced solid–liquid separation of dairy manure with natural flocculants," *Bioresour. Technol.,* vol. 100, no. 22, pp. 5417–5423, Nov. 2009, doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.012.

[10] L. Manfredi, R. J. Hill, and T. G. M. Ven, "Bridging flocculation of PEI-functionalized latex particles using nanocrystalline cellulose," *J. Colloid Interf. Sci.,* vol. 360, no. 1, pp. 117–123, Aug. 2011, doi.org/10.1016/j.jcis.2011.04.081.

[11] Z. Yang, Y Shang, Y. Lu, Y. Chen, X. Huang, A. Chen, Y. Jiang, W. Gu, X. Qian, H. Yang, and R. Cheng, "Flocculation properties of biodegradable amphoteric chitosan-based flocculants," *Chem. Eng. J.,* vol. 172, no. 1, pp. 287–295, Aug. 2011, doi.org/10.1016/j.cej.2011.05.106.

[12] J. Li, S. Jiao, L. Zhong, J. Pan, and Q. Ma, "Optimizing coagulation and flocculation process for kaolinite suspension with chitosan," *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.,* vol. 428, pp. 100–110, Jul. 2013, doi.org/10.1016/j.colsurfa.2013.03.034.

[13] L. Chai, Q. Li, Q. Wang, and X. Yan, "Solid-liquid separation: an emerging issue in heavy metal wastewater treatment," *Environ. Sci. Pollut. Res.,* vol. 25, pp. 17250–17267, 2018, doi.org/10.1007/s11356-018-2135-7.

[14] B. Wang, S. F. Wang, S. S. Lam, C. Sonne, T. Q. Yuan, G. Y. Song, and R. C. Sun, "A review on production of lignin-based flocculants: sustainable feedstock and low carbon footprint applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.,* vol. 134, no. 110384. 2020, doi.org/10.1016/j.rser.2020.110384.

[15] P. Mousavioun and W. O. Doherty, "Chemical and thermal properties of fractionated bagasse soda lignin," *Ind. Crops Prod.,* vol. 31, pp. 52–58, Jan. 2010, doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.09.001.

[16] J. Chen, A. E. Kazzaz, N. A. Mazandarani, Z. H. Feizi, and P. Fatehi, "Production of flocculants, adsorbents, and dispersants from lignin," *Mol.,* vol. 23, no. 868, Apr. 2018, doi:10.3390/molecules23040868.

[17] R. K. Dwari, S. I. Angadi, and S. K. Tripathy, "Studies on flocculation characteristics of chromite's ore process tailing: Effect of flocculants ionicity and molecular mass," *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.,* vol. 537, pp. 467-477, 2018, doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.10.069.

[18] N. C. Karmakar, B. S. Sastry, and R. P. Singh, "Flocculation of chromite ore fines suspension using polysaccharide based graft copolymers," *Bull. Mater. Sci.,* vol. 25, pp. 477–478, 2002, doi.org/10.1007/BF02710531.

[19] S. Davey, "Amylopectin-graft-hydrolyzed-poly (methyl acrylate) (AP-g-H-PMA) Flocculants for the Treatment of Oil Sands Tailings," M.S. thesis, Depart. of Chem. and Mater. Eng. Univ. of Alberta, Canada, 2020.

[20] F. Oruç and E. Sabah, "Effect of mixing conditions on flocculation performance of fine coal tailings," in *Proc. XXIII IMPC,* Istanbul, Türkiye, 2006, pp. 3–8.

[21] K. Asgari, H. Khoshdast, F. Nakhaei, M. R. Garmsiri, Q. Huang, and A. Hassanzadeh, "A review on floc-flotation of fine particles: technological aspects, mechanisms, and future perspectives," *Miner. Process. Extr. Metall. Rev.*, vol. 45, pp. 669-696, 2024, doi.org/10.1080/08827508.2023.2236770.

[22] M. Ataie, K. Sutherland, L. Pakzad, and P. Fatehi, "Experimental and modeling analysis of lignin derived polymer in flocculating aluminium oxide particles," *Sep. Purif. Technol.,* vol. 247, no. 116944, 2020, doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116944.

[23] W. He, Y. Zhang, and P. Fatehi, "Sulfomethylated kraft lignin as a flocculant for cationic dye," *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.,* vol. 503, pp. 19–27, Aug. 2016, doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.05.009.

Dicle University
Journal of Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/dumf
duje.dicle.edu.tr

Araştırma Makalesi /Research Article

Bor Cevher Atıklarından Rubidyumun Seçimli Yöntemlerle Kazanımı

Recovery of Rubidium from Boron Ore Wastes by Selective Methods

Ayşegül Yücel[1*], Musa Sarıkaya[2]

[1] İskenderun Teknik Üniversitesi, İskenderun MYO, Çevre Koruma Teknolojileri, aysegul.yucel@iste.edu.tr
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7069-7518
[2] İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği, musa.sarikaya@inonu.edu.tr
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4942-4472

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 25 Mart 2025
Revizyon 16 Nisan 2025
Kabul 22 Mayıs 2025
Online 30 Haziran 2025

Anahtar Kelimeler:

Bor cevher atığı, Rubidyum, Lityum, Kavurma, Su liçi.

ÖZ

Rubidyumun kimyasal ve optoelektronik özelliklerden dolayı biyomedikalden kuantum hesaplamalarına, kuantum ısı motorlarından havacılığa kadar yaygın alanlarda kullanımları araştırılmaktadır. Hatta konumlama uydularında kullanılacak atom saatlerinde de rubidyum atomu kullanılmaktadır. Rubidyumun mineral yatağının bulunmamasına ragmen lityum kaynaklarında birlikte bulunmaktadır. Çalışma kapsamında Eti Maden İşletmeleri Eskişehir Kırka Bor İşletme Müdürlüğü'ne ait atık havuzundan temin edilen bor cevher atığında yapılan XRF analizinde 135,9 ppm rubidyum içeriğitespit edilmiştir. Bor cevher atığından seçimli yöntem kullanarak rubidyum elde edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla çalışma kavurma (i), lityumu karbonat formunda ayırma (ii) ve son olarak ise rubidyumu kazanılması (iii) olarak üç aşamada tamamlanmıştır. Bor cevher atığında bulunan 135,9 ppm rubidyumun yaklaşık %1,5 oranında çözeltiye alınması mümkün olmuştur.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 25 March 2025
Received in revised form 16 April 2025
Accepted 22 May 2025
Available online 30 June

Keywords:

Boron ore waste, Rubidium, Lithium, Roasting, Water leaching

ABSTRACT

Due to rubidium's chemical and optoelectronic properties, its usage in widespread areas ranging from biomedicine to quantum calculations, from quantum heat engines to aviation, is being investigated. Even the rubidium atom is used in atomic clocks to be used in positioning satellites. Although rubidium does not have a mineral deposit, it is found together in lithium sources. Within the scope of the study, 135.9 ppm rubidium content was determined in the XRF analysis performed on boron ore waste obtained from the waste pool belonging to Eti Mining Operations Eskişehir Kırka Boron Operations Directorate. Rubidium was attempted to be obtained from boron ore waste using a selective method. For this purpose, the study was completed in three stages: roasting (i), separating lithium in carbonate form (ii), and finally recovering rubidium (iii). It was possible to take approximately 1.5% of the 135.9 ppm rubidium found in the boron ore waste into solution.

DOI: 10.24012/dumf.1664981

* Sorumlu Yazar

Giriş

Lityumun lepidolitten elde edilmesinde kullanılan başlıca yöntemler şunlardır; sülfatla kavurma yöntemi [1], [2], [3], klorla kavurma yöntemi [4], [5], [6], termal aktivasyon yöntemi [7], HF (hidroflorik asit) yöntemi [8], [9], [10] ve alkali otoklavlama yöntemidir [11], [12]. Sülfatla kavurma yöntemi, klorla kavurma yöntemi, termal aktivasyon yöntemi ve HF yöntemi literatürde çeşitli araştırmacılar tarafından detaylı olarak incelenmiştir. Ancak, HF yönteminde yüksek miktarda florür iyonun kullanılması proses zorluklarına ve çevre kirliliğine yol açabileceği göz önünde bulundurulmalıdır [8]. Alkali otoklavlama yöntemi ise yüksek basınçlı ekipmanların kullanımı ve alkali tüketimi gibi çevresel sorunlarla karşılaşabilir ve ekonomik açıdan laboratuvar ölçekli çalışmalar dışında avantaj sağlamayabilir. Klorla kavurma yöntemi ise yüksek korozyona direnç gösteren ekipmanlara ihtiyaç duyduğu için ekonomik açıdan

tercih edilmeyebilir [13], [14]. Bu nedenle, kavurma yöntemi, enerji tüketimi bakımından dezavantajlı olmasına[7] rağmen, lityumun lepidolitten elde edilmesinde en yaygın kullanılan yöntemdir. Lityum kazanımının yan ürünü olan rubidyum için ise bu yöntemlerden biri veya birkaçının birleştirilerek verimli kazanım yöntemleri araştırılmaktadır.

Zhou vd. (2015), çalışmalarında kaolin kil atıklarından rubidyum kazanımını hedeflemişlerdir. Bu amaçla, iki farklı yöntem uygulamışlardır. Bunlardan biri doğrudan asit yıkama ve diğeri ise klorla kavurma- su liçi yöntemlerinin birleşmesidir. HCl asidi ile yapılan doğrudan yıkama işlemi sonucunda maksimum rubidyum ekstraksiyon verimi %30,6 iken, H_2SO_4 asidi kullanımıyla bu verim %95,5'e yükselmiştir. Ancak, bu yöntemlerin pratik uygulanabilirliği ve maliyet açısından uygunluğu konusunda bazı sınırlamalar olduğunu belirtmişlerdir. Klorla kavurma- su liçi işlemi ise belirlenen parametreler (kavurma sıcaklığı, liç süresi, katı/sıvı oranı vb.) doğrultusunda en yüksek rubidyum verimini %93,4 olarak sağlamıştır. Bu sonuçlar, deney koşullarının 900°C sıcaklıkta ve 30 dakika süreyle uygulandığı, kaolin kil atık /$CaCl_2$/NaCl kütle oranının ise 1,0:0,3:0,2 olduğu kavurma işlemi ile elde edilmiştir [15].

Ertan ve Erdoğan (2016) çalışmalarında, bor kilinden rubidyum elde etmeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla, taç eterlerle solvent ekstraksiyonu yöntemini kullanmışlardır. İlk olarak, bor kiline 2 saat boyunca 1 M H_2SO_4 işlemi uygulanmış ve ardından katı-sıvı ayrımı yapılmıştır. İkinci aşamada, rubidyum, nitrobenzen içinde bulunan 18-Crown-6 (0,1 M) ile pikrik asitten ekstrakte edilmiş ve organik faz 2 M HCl ile ayrılmıştır. Bu süreç sonucunda en yüksek rubidyum ekstraksiyon verimi %89,52 olarak elde edilmiştir [16].

Vieceli vd. (2017), kavurma işlemi sırasında $NaSO_4$ ve $CaSO_4$ gibi katkı maddelerinin kullanımını lepidolitten lityum ve rubidyumun ekstraksiyonları arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Yapılan çalışmada, katkı maddelerinin miktarının ve kavurma sıcaklığının artmasıyla ekstraksiyon veriminin arttığı belirtilmiştir. Bu bulgu, kavurma işleminin optimizasyonunda katkı maddelerinin ve sıcaklık parametrelerinin önemli olduğunu göstermektedir [2].

Yan vd. (2012), lepidolitten lityum elde etmek için klorlama ve su liçi yöntemlerini birlikte uygulamışlardır. Kavurma işlemi sırasında NaCl ve $CaCl_2$ kullanarak gerçekleştirilen çalışmada, en iyi lityum ekstraksiyon sonucunun 880°C'de elde edildiği ve bu işlem sonucunda elde edilen rubidyum verimliliğinin %93,60 olduğu rapor edilmiştir. Bu bulgular, lityum ve rubidyumun etkili bir şekilde ekstraksiyonu için klorlama ve su liçi yöntemlerinin birleştirilmesinin mümkün olduğunu göstermektedir [4].

Zhang vd. (2019), lepidolit mineralinden lityum, rubidyum ve sezyum elde etmek amacıyla sülfürik asit ile kavurma işlemi gerçekleştirmiş ve ardından su liçi yöntemiyle %96 rubidyumu çözeltiye aldıklarını bildirmişlerdir. Çalışmada, fırın sıcaklığının 200°C, H_2SO_4 konsantrasyonunun ağırlıkça %85, kavurma süresinin 4 saat ve su liçi çalışma sıcaklığının 85°C olduğu koşulların, rubidyumun en yüksek verimle çözeltiye alındığı koşullar olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca, kavurma işlemi sırasında rubidyumun $RbAl(SO_4)$ fazında olabileceği belirtmişlerdir [17].

Rubidyumun kazanımında solvent ekstraksiyonu, iyon değişimi ve çökeltme gibi yöntemlerin araştırılması devam etmektedir, ancak en umut verici yöntemin solvent ekstraksiyonu olduğu öngörülmektedir [18]. Bu yöntemde kullanılan üç tip ekstraktan bahsedilmektedir. Bunlar; klorlu kobalt dikarboksimit (CCD) [19], kaliksaren-taç eterler (örneğin BOBCalixC6) [20] ve BAMBP (4-tert-butil-2-(α-metilbenzil)-fenol) [21]. BAMBP dışında kalan ilk iki tür ekstraktör, uzun sentez prosedürleri gerektiren ve çok yüksek maliyetli olabilen karmaşık yapılarla ilişkilendirilmiştir [22]. BAMBP ise alkali metalleri Cs>Rb>K>Na>Li sırasına göre çıkarmaktadır. Alkali metal iyonları, alkali çözelti içerisinde fenoller yardımı ve katyon değişimi yoluyla ekstrakte edilmektedir. Su fazında çözünmeyen ancak organik fazda çözünen fenolik tuz, inorganik bir asit ile kolaylıkla ayrılabilir [23].

Liu vd. (2015), 2.0 mg/L Cs^+, 20.0 mg/L Rb^+, 19.39 g/L Na^+, 28.38 g/L Mg^{2+}, 2.772 g/L K^+ ve 0.685 g/L Li^+ gibi bileşenler içeren bir tuz gölünden rubidyum ve sezyum kazanma amacıyla 1 M t- BAMBP ve 0,5 M NaOH kullanmışlardır. Beş aşamalı işlemin ardından, nihai rubidyum kazanım veriminin %95,04 olduğunu rapor etmişlerdir. Ayrıca, organik fazın sulu faza (O/A) hacimsel oranının artmasıyla Rb^+'nın ekstraksiyon veriminin yükseldiğini belirtmişlerdir [23].

Lv vd. (2020), polilitiyonit mineralinden lityum ve rubidyum elde etme amacıyla solvent ekstraksiyonu ve alkali liç yöntemini bir arada kullanmışlardır. Alkali liç yöntemi uygulandıktan sonra elde edilen rubidyumca zengin süzüntü, ksilen ile seyreltilerek t- BAMBP (4-tert-butil-2-(α-metilbenzil)-fenol) kullanılarak özütleme işlemine tabi tutulmuştur [12].

Chen vd. (2020), tuzlu sudan (brine) rubidyumu elde etmek için iki aşamalı bir özütleme işlemi gerçekleştirmişlerdir. t-BAMBP'yi seyreltmek için kerosen kullanmışlardır. Organik/Sulu ortam oranı 0,1 ve 5°C reaksiyon sıcaklığında, 0,5 M t-BAMBP kullanarak rubidyum özütleme gerçekleştirilmiş, son olarak ise %98 saflıkta rubidyum karbonat elde etmek için 0,5 M amonyak ve 35°C reaksiyon sıcaklığında amonyum karbonat eklenmiştir [24].

Liu vd. (2022), lityum minerali olan lepidolitten rubidyum kazanma amacıyla 800°C'de 5 ve 2 saatlik iki aşamalı kavurma işlemi uygulamışlardır. Daha sonra, 0.6 mol/L NaOH, 1.5 mol/L t-BAMBP ve O/A = 2 koşulları altında beş aşamalı solvent ekstraksiyonu gerçekleştirmişlerdir. Bu işlemlerin sonucunda rubidyumun solvent ekstraksiyon veriminin %99.2 olduğunu belirtmişlerdir [7].

Zeng vd. (2021), biyotit içeren minerallerden rubidyum elde etme amacıyla farklı oksalik asit konsantrasyonlarının liç süresi ve liç sıcaklığı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Deneyler, 0,5 - 4 mol/L arasında asit konsantrasyonu, 25 - 90°C arasında sıcaklık ve 15 - 180 dakika aralıklarında gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar, rubidyum için oksalik asidin uygun bir ekstrakte malzemesi olduğunu belirtmişlerdir. Rubidyum liç veriminin en yüksek değerini, %94,26 oranında, 3 mol/L oksalik asit konsantrasyonunda elde ettiklerini rapor etmişlerdir. Yüksek oksalik asit konsantrasyonunun bu kadar yüksek bir verim sağlamasının, çözelti içindeki H^+ iyonlarının miktarıyla ilişkilendirildiği

belirtilmiştir. Ayrıca, minerallerin yapısında bulunan demir için, yüksek miktarda oksalik asit ile demirin reaksiyona girerek demir oksalat dihidrat bileşiğini oluşturduğu ve böylece çözeltiden demirin çöktürülerek uzaklaştırıldığı rapor edilmiştir [25].

Çözelti halindeki rubidyumun saflaştırılması, düşük sıcaklıklarda daha az çözünür olması nedeniyle fraksiyonel kristalleşme yöntemiyle mümkün olabilmektedir [26]. Fraksiyonel kristalleşme yöntemi, dünyanın magmatik sistemine benzetilebilir. Erimiş mağmanın, minerallerin çekirdeklenmesine, büyümesine ve artık sıvıdan ayrılmasına izin verecek kadar yavaş soğuması gibidir [27]. Vieceli vd. (2017), yaptıkları çalışmada, teorik olarak doymuş rubidyum çözeltisine ait rubidyum denge konsantrasyon eğrisini çizdiklerinde, 10°C'nin altındaki sıcaklıklarda rubidyum konsantrasyonunun 0,1 mg/L'den az olduğunu gözlemlediklerini belirtmişlerdir [2]. Saf rubidyum şapının elde edilmesi amacıyla kristallendirme işleminin yaklaşık 30 kez tekrarlanabileceği öngörülmüştür [26], [28].

Lityum, rubidyum ve sezyumun ekstraksiyon yöntemleri arasında en yaygın kullanılanı kavurma ve su liçi yöntemidir. Lityum minerali olan lepidolitin kavurma ve su liçi yöntemiyle yapılan çalışmaların bir özeti, Tablo 1'de sunulmuştur. Farklı kimyasallar kullanılarak yapılan kavurma işleminden sonra elde edilen rubidyum verimleri genellikle lityum içerikleriyle birlikte verilmiştir. Bu çalışmalarda, en yüksek rubidyum veriminin 850°C'de 30 dakika kavurma süresinde elde edildiği görülmüştür ve bu verim %74,7 olarak rapor edilmiştir [4].

Tablo 1. Lepidolitin kavurma ve su liçi yöntemi kullanılarak yapılan çalışmaların özeti [26].

Deney Şartları	Metal Kazanımı (%)	Referans
Kavurma: Lepidolit/Na_2SO_4/K_2SO_4/CaO Kütle oranı: 1:0,5:0,1:0,1 850°C, 30 dk Su liçi: sıvı/katı oranı 2,5/1, 30 dk	%91,6 Li, %74,7 Rb	[4]
Kavurma: Lepidolit/Na_2SO_4/$CaCl_2$ Kütle oranı: 1:0,5:0,3 880°C, 30 dk	>%90 Li, Rb ve Cs	[4]
Kavurma: Lepidolit/$CaSO_4.2H_2O$/Na_2SO_4 Kütle oranı: 3:1 850°C, 120 dk	~%80 Li ve Rb	[2]
Kavurma: SO_4/Li ve Ca/F Kütle oranı: 3:1 ve 1:1 850°C, 90 dk	%93,3 Li, %33,2 Rb	[29]
Kavurma: Lepidolit/NaCl/$CaCl_2$ Kütle oranı: 1:0,6:0,4 880°C	~%93 Li, Rb ve Cs	[4]

Literatürde rubidyumun kazanımı ile ilgili kısıtlı bilgi bulunmaktadır. Kazanım proseslerinde en etkili yöntem BAMBP kimyasalının kullanılmasına rağmen yaygın ve ekonomik bir yöntem değildir. Lityumun mevcut olduğu kaynaklarda bulunması nedeniyle de lityum kazanım yöntemlerinde en yaygın kullanılan kavurma – su liçi hibrit kazanım yönteminde rubidyum kazanımında da yaygın olarak kullanılmıştır. Bir başka deyişle lityum kazanımının yan ürünü olarak rubidyum kazanımı yapılmaya çalışılıyor denilebilir.

Çalışma kapsamında Eti Maden İşletmeleri Eskişehir Kırka Bor İşletme Müdürlüğü'ne ait atık havuzundan temin edilen ve yapılan XRF analizi sonucunda 135,9 ppm rubidyum içeriğine sahip bor cevher atığından rubidyumun seçimli yöntem kullanarak edilmesi amaçlanmıştır. Söz konusu çalışmada belirli karışım oranlarında hazırlanan örnekler sırasıyla kavurma ve su liçi işlemlerine tabi tutulmuştur. Kavurma süresi, kavurma sıcaklığı ve karışım oranlarının çözeltideki rubidyum oranını nasıl etkilediği incelenmiştir.

Malzeme ve Yöntemler

Malzemeler

Bor cevher atıklarından lityum kazanım çalışmalarının yapılabilmesi amacıyla Eti Maden İşletmeleri Eskişehir Kırka Bor İşletme Müdürlüğü'ne ait atık havuzundan bor cevher atığı numunesi temin edilmiştir. Söz konusu atığın faz karakterizasyonu amacıyla XRD ve termal bozunmaya yönelik termal gravimetrik analizi yapılmıştır.

XRD analizi İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümüne ait Rigaku marka Miniflex 600 model cihazda yapılmıştır. Tüm numuneler için ölçüm şartları 40 kV, 15mA, filtresi K – beta, tarama hızı 6°/dakika, dalga boyu 1.54050 Å, tarama açısı 10° - 80° arasında yapılmıştır. Her aşamada malzemelerin tanımlanması cihaza ait "The International Centre for Diffraction Data" Powder Diffraction File (ICDD PDF2.DAT) veri kütüphanesinden yararlanılmıştır.

Termal analiz için İnönü Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümüne ait Shimadzu 50 Termogravimetrik Analizör kullanılmıştır. Yapıların termal kararlıklarının ve bozunma sıcaklıklarının belirlenmesi amacıyla sabit hava atmosferinde 10°C/dk ısıtma hızlarında yaklaşık 10 mg numune ile termal analizleri yapılmıştır.

Temin edilen atığın XRF analizi Aksaray Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne ait Pan Analytical Marka Axios Max WD-XRF Model cihazı ile yapılmıştır.

Çözelti içerisinde bulunan rubidyum ve lityum konsantrasyonlarının belirlenmesi amacıyla Yozgat Bozok Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde bulunan Thermo Scientific marka iCAP Qc model indüktif eşleşmiş plazma – kütle spektrometresi kullanılmıştır. ICP – MS ölçümlerinde kullanılan yönteme ait çalışma parametreleri radyofrekans gücü 1550 W, nebülizör gazı 0,96 L/dk, plazma gazı 0,88 L/dak, nebülizör basıncı 3,01 bar, bekleme süresi 0,01 ms ve püskürtme odası sıcaklığı 37°C olacak şekilde ayarlanmıştır. Örnekleyici probu, enjeksiyonlar arasında 30 saniye boyunca ultra saf su ile durulanarak, ardından 45 saniye boyunca %2 HNO_3 ile

yıkanarak ve son olarak 45 saniye boyunca ultra saf su ile durulanarak yıkandı. Sonuçların doğruluğunu sağlamak için numunelerin ve standartların her ölçümü üç kez tekrarlanmıştır.

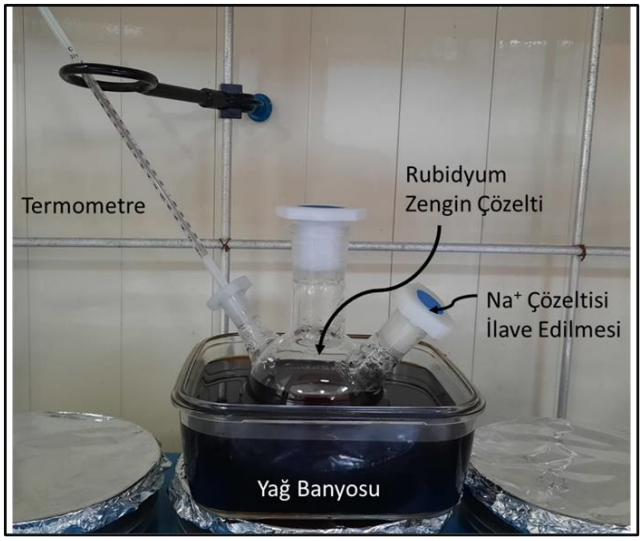
Yöntemler

Lityum kazanımında yaygın olarak birlikte kullanılan kavurma yöntemi ile su liçi rubidyum kazanımında da kullanılmıştır [29], [30], [31]. Kavurma işlemlerinde $CaSO_4.2H_2O$ ve $CaCO_3$ kullanılmıştır. Kimyasallar bor cevher atığına ağırlıkça 5:1:1, 5:1,5:1,5, 5:2:2 ve 5:5:5 (atık:$CaSO_4.2H_2O$:$CaCO_3$) oranlarında ilave edilmiştir. $CaCO_3$ önemli bir inorganik kimyasal olup özellikle üretim metalürjisinde temel cüruf yapıcı ve refrakter hammaddesi şeklinde yaygın olarak kullanılmaktadır. $CaCO_3$'ın parçalanması endotermik bir reaksiyondur. Ortamdan aldığı ısıyı parçalanma esnasında kullanmaktadır. Böylece ortamda CaO(k) ve CO_2(g) bulunmaktadır. Bu tepkime tersinir bir olaydır. Söz konusu çalışma deneylerinde de $CaCO_3$ kullanım amacı yüksek sıcaklıkta çalışma olanağının sağlanması, tersinir tepkime özelliğinden dolayı atıkta bulunan kalsiyum ve magnezyum iyonları ile birleşerek karbonat, silikat ve oksit bileşiklerinin oluşumuna yardımcı olmasıdır. Kavurma sıcaklığı 800°C, 850°C ve 900°C ve kavurma süresi 30, 60, 90, 120 dakika olarak tercih edilmiştir. Bu çalışmaya ilaveten sıcaklık ve zamana bağlı olarak katkısız bor cevher atığı aynı sıcaklıklarda kalsine edilmiştir. Ayrıca ICP – MS ölçümleri sonucunda rubidium konsantrasyonları incelendiğinde katkısız olan bor cevher atığı kalsinasyonunda 5, 10 ve 15 dakika etki süresi de incelenmiştir.

Daha sonra katı/sıvı oranı %5 olacak şekilde 500 mL çift distile saf su içerisine kavurma yapılmış ürün ilave edilmiştir. Bu çözelti ortamında 24 saat sonunda örnekler alınarak ICP - MS ölçümleri rubidium ve lityum konsantrasyonları belirlenmiştir. En yüksek rubidium konsantrasyonuna sahip çözelti 30 dakika 800°C'de kalsine edilen katkısız bor cevher atığı olan numuneden elde edilmiştir. Bu çözeltide bulunan rubidium konsantrasyonu 2092,47 ppb olarak tespit edilmiştir. Katı/sıvı ayrımı 10.000 rpm dönüş hızında 10 dakika santrifüj ile yapıldıktan sonra katı artık etüvde 105°C'de bir gece kurutulup ve XRD analizi yapılmıştır. Elde edilen verileri göre rubidyum konsantrasyonun en yüksek olduğu çözeltiden lityumun ayrılması için bir sonraki aşamaya geçilmiştir. Söz konusu çözelti içerisinde bulunan lityum konsantrasyonu ise 34138,33 ppb olarak tespit edilmiştir. Santrifüjde ayrılan çözelti kısmında ise ilk işlem olarak lityumu çöktürerek Li_2CO_3 formunda elde etmek amacıyla Na_2CO_3 ilave edilmiştir [32], [33].

Bunun için belirli derişimlerde hazırlanan Na_2CO_3 çözeltisi 80°C'de lityum içeren çözeltiye damla damla ilave edilerek reaksiyonun başlaması sağlanmış [34] ve deney düzeneği Şekil 1'de verilmiştir. Lityum karbonat kristalleri oluştuktan sonra santrifüj yardımıyla katı kısım ayrılarak karakterizasyon analizleri yapılmıştır. Ayrılan çözelti ise bir sonraki aşamada kullanılmak amacıyla ayrılmıştır. Deney sürecindeki oluşması beklenen reaksiyon (Tepkime 1) aşağıda verilmiştir.

$Li_2SO_4 + Na_2CO_3 \rightarrow Li_2CO_3 + Na_2SO_4$ (Tepkime 1)



Şekil 1. Lityum çöktürme deney düzeneği

Bir sonraki aşamada safsızlıkların giderilmesi amacıyla çözelti pH'sını değiştirme yöntemi kullanılmıştır. Mevcut çözeltinin pH değeri 11 olduğundan dolayı bazik ortam çalışması yapılmamıştır. Fe ve Al gibi çözünmüş safsızlıkların da çözelti içinde bulunabileceği ön görüldüğünden bu safsızlıkların gideriminde farklı pH değerlerinde (pH 5,5 – 6,5 aralığında Al ve Fe) metal hidroksitler ve alçıtaşı olarak çökeltilmeleri sağlanmaya çalışılmıştır [13]. pH düzenlemeleri 0,1 M olarak hazırlanan HCl asit çözeltisinin damla damla ilave edilmesi ile ayarlanmıştır.

Son aşama da rubidyum karbonat elde etmek amacıyla amonyum karbonat ilave edilmiştir [24]. Su liçinde lityum karbonat kristalleri oluştuktan sonra santrifüj ile katı/sıvı ayrımı yapıldıktan sonra elde edilen çözelti rubidyumun hidroksit formunun varlığı düşünüldüğünden deney sürecinde olması beklenen reaksiyon (Tepkime 2) aşağıda verilmiştir. Literatürde amonyum karbonat miktarı ile ilgili net bir bilgi olmadığından ve rubidyum kaynağının farklı olmasından dolayı ayrıca çözelti içerisindeki rubidyum konsantrasyonu 2092,47 ppb olması nedeniyle 10000 ppb konsantrasyonda amonyum karbonat çözeltisi hazırlanmış ve rubidyum içeren çözeltiye damla damla ilave edilerek reaksiyonun gerçekleşmesi sağlanmıştır. Rubidyum karbonatın çöktürülmesi aşamasında 10°C'nin altında çalışma yapılmaya çalışılmıştır [2]. Olası reaksiyon aşağıda verilmiştir.

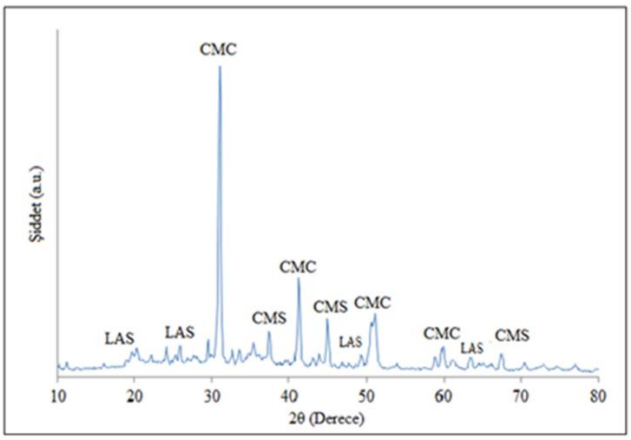
$(NH_4)_2CO_3 + RbOH \rightarrow Rb_2CO_3 + NH_3 + H_2O$ (Tepkime 2)

Sonuçlar ve Tartışma

Atık Karakterizasyonu

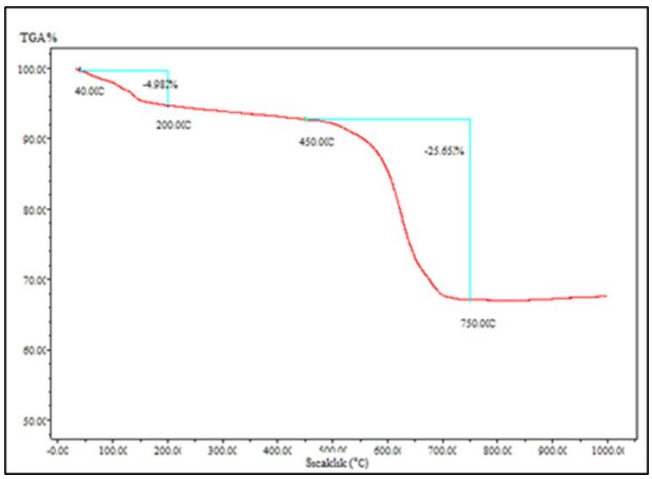
Bor cevher atığı numunesine ait XRD pikleri baz alınarak ve yazılımsal hesaplanan RIR (Reference Intensity Ratio/ Referans Yoğunluk Oranı) metoduna göre %11,8 $CaMg(CO_3)_2$, % 81 $Ca_7Mg_{7.25}Si_{14}$ ve %7,2 $LiAlSiO_4$'dan oluştuğu görülmüştür [34]. Numunenin XRD analizi incelendiğinde atığın trigonal kristal sistemine sahip $CaMg(CO_3)_2$ (PDF kart no: 01-075-1655), hegzagonal kristal sistemine sahip $Ca_7Mg_{7.25}Si_{14}$ (PDF kart no: 01-088-1551) ve son olarak hegzagonal kristal yapısına sahip $LiAlSiO_4$'tan

(PDF kart no: 01-073-0254) oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Bor cevher atığının XRD analizi (LAS: $LiAlSiO_4$; CMC: $CaMg(CO_3)_2$; CMS: $Ca_7Mg_{7,25}Si_{14}$)

Atığa ait termal bozunmayı gösteren termal gravimetrik analiz Şekil 3'de verilmiştir. Kavurma sıcaklığının seçilmesinde bor cevher atığına ait termal gravimetrik analiz göz önünde bulundurulmuştur. Atık iki yerde kütle kaybına uğramıştır. İlki 200°C'ye kadar olan kısımdadır. Bu bölgede yapı içerisinde bulunan su ve kristal su uzaklaşmış ve kütle kaybı %4,98 olmuştur. İkinci bölge ise karbonatlı bileşiklerin uzaklaştığı 450°C ile 750°C arasında ise kütle kaybı %25,65 olmuştur. Bir başka deyişle söz konusu atıktan safsızlıkların uzaklaştırılması ve yapının dengede kalması 750°C civarında olabileceği kabul edilebilir[34].



Şekil 3. Bor cevher atığının termal gravimetrik analizi

Ayrıca XRF analizinde (Tablo 2) temin edilen numunenin 135,9 ppm rubidyum içeriğine sahip olduğu görülmüştür [34].

Tablo 1. Bor cevher atığının XRF analizi [34]

Bileşik/Element	Miktar (%)	Element	Miktar (ppm)
Na_2O	2,98	Sc	55,2
MgO	16,13	V	7,8
Al_2O_3	0,76	Co	18,8
SiO_2	15,50	Ni	17,9
P_2O_5	0,01	Cu	37,4
K_2O	0,59	Zn	2,7
CaO	24,16	Ga	0,7
TiO_2	0,04	Ge	20
MnO	0,02	As	13,2
Fe_2O_3	0,41	Rb	135,9
SO_3	0,45	Mo	2,1
Cl	0,06	Cd	4,3
Sr	1,99	Sn	3,5

Çözeltideki Rubidyum Konsantrasyonlarının Belirlenmesi

Bor cevher atığından rubidyumun elde edilmesi amacıyla kavurma işlemi ve ardından su liçi yapılmıştır. Böylelikle rubidyumun çözeltiye geçmesi sağlanmaya çalışılmıştır. Bu aşamada elde edilen rubidyum konsantrasyon verileri Şekil 4'de verilmiştir.

800°C'de yapılan kavurma işleminin ardından çözeltiye geçen rubidyum konsantrasyonu (Şekil 4.a) en yüksek çalışma koşulları 5:1:1 (atık:$CaSO_4.2H_2O$:$CaCO_3$) oranlarında ve 90 dakika kavurma yapılan örnekte 1590,90 ppb olarak tespit edilmiştir. İlave edilen kimyasalların miktarı arttıkça rubidyumun çözeltiye geçme miktarının azaldığı görülmüştür. Rubidyum çıkarma mekanizması hakkındaki tartışmalar hala yetersizdir. Bildiğimiz kadarıyla, bugüne kadar rubidyum çıkarma işlemi hakkında kapsamlı bir inceleme yapılmamıştır [35]. Ancak lityumun çözeltiye alınması ile benzer eğilimde olması [35] nedeniyle benzer yöntem ile lityum elde edilirken katkı maddesinin artmasıyla lityumun çözeltiye geçme miktarı düşmüştür [36]. Yücel vd., (2025) yaptıkları çalışmada ilave edilen kimyasalların etkisiyle lityum sülfat bileşiğinin 860ºC civarında erime sıcaklığına ulaştığını, bu nedenle sıcaklığın etkisiyle lityum iyonları karışımın sıvı faza geçerken $CaSO_4$ ve CaO fazlarının kafes yapısında tutulmasıyla ilişkilendirmişlerdir [36]. Rubidyumun elementel erime noktası 39.30ºC, kaynama noktası ise 688ºC [37]olduğu göz önüne alınırsa, rubidyumun da ilave edilen kimyasalların kafes yapısında tutulabileceği şekliyle yorumlanabilir.

Şekil 4.b'de 850°C'de yapılan kavurma işleminin ardından su liçi ile çözeltiye geçen rubidyum konsantrasyonu verilmiştir. Bu grupta en yüksek rubidyum konsantrasyonu (1847,79 ppb) 60 dakika süreyle 5:1:1 (atık:$CaSO_4.2H_2O$:$CaCO_3$) oranlarında karıştırılan numunelerde elde edilmiştir.

Şekil 4.c'de ise 900°C'de yapılan çalışmaların sonuçları verilmiştir. Zamana bağlı olmaksızın kimyasal katkısının artması ile çözeltiye geçen rubidyum miktarının düştüğü görülmüştür. Çözeltiye geçen en yüksek rubidyum miktarı 5:1:1 (atık:$CaSO_4.2H_2O$:$CaCO_3$) oranlarında karıştırılan ve

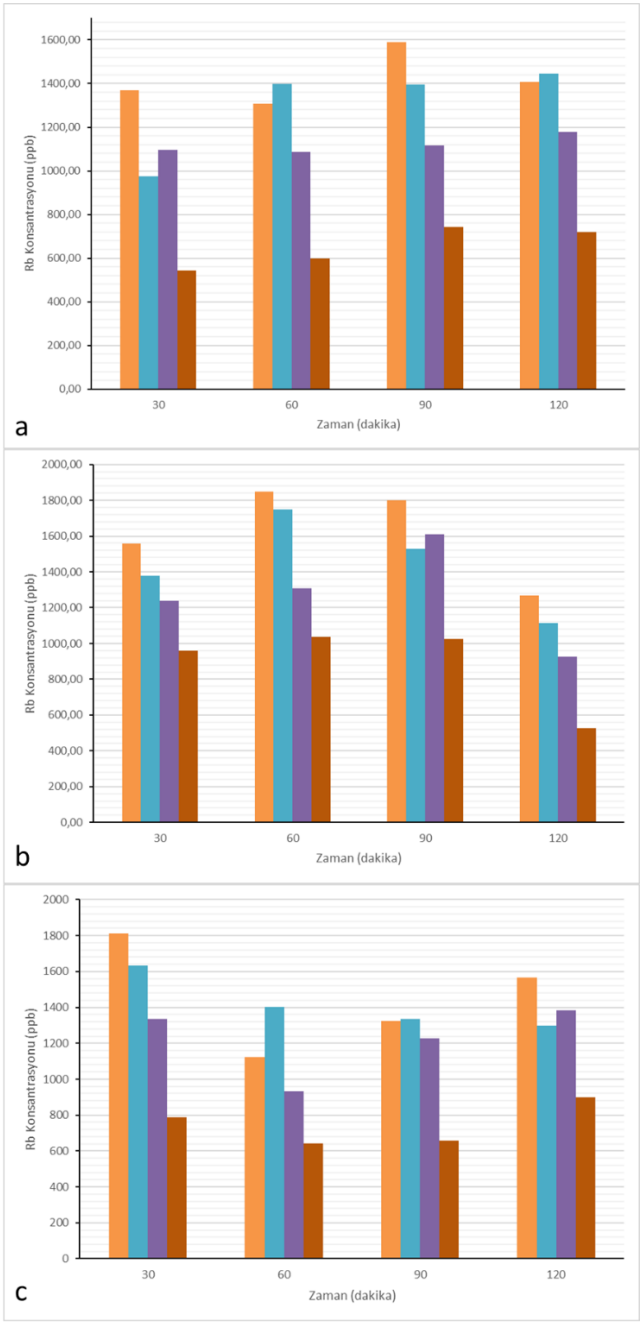
30 dakika boyunca ısıl işleme maruz kalan numunede 1811,97 ppb olarak tespit edilmiştir.

Kavurma sonrası yapılan su liçi sonrası rubidyum konsantrasyonunun her sıcaklık parametresinde ağırlıkça 5:1:1 (atık:$CaSO_4.2H_2O$:$CaCO_3$) oranlarında hazırlanan karışımda elde edildiği görülmüştür. Bu karışım oranındaki rubidyumun çözeltiye geçmesinde kavurma sıcaklığının artışının ve kavurma süresinin etkili parametreler olduğu tespit edilmiştir. Söz konusu karışım oranında en yüksek rubidyum konsantrasyonunun (1847,79 ppb) elde edildiği sıcaklık ve zaman parametreleri sırasıyla 850°C ve 60 dakikadır.

Karışım oranı ağırlıkça 5:1,5:1,5, (atık:$CaSO_4.2H_2O$:$CaCO_3$) olarak hazırlanan örneklerin çözeltideki en yüksek rubidyum oranları incelendiğinde 800°C sıcaklıkta ve 120 dakika kavurma süresinde 1445,49 ppb, 850°C sıcaklıkta ve 60 dakikada 1747,55 ppb ve son olarak 900°C'da 1335,53 ppb olarak elde edilmiştir.

Ağırlıkça 5:2:2 (atık:$CaSO_4.2H_2O$:$CaCO_3$) oranına sahip örneklerin çözeltiye geçen rubidyum konsantrasyonları incelendiğinde 800°C kavurma sıcaklığındaki örneklerde sonuçların birbirine yakın ve ortalama olarak 1120,01 ppb olduğu görülmektedir. En yüksek konsantrasyon 120 dakika kavurma süresinde 1179,44 ppb tespit edilmiştir. 850°C kavurma sıcaklığında en yüksek değer 90 dakika kavurma süresinde 1607,67 ppb iken 900°C kavurma sıcaklığında en yüksek değer ise 1384,71 ppb ile 120 dakika kavurma süresinde elde edilmiştir.

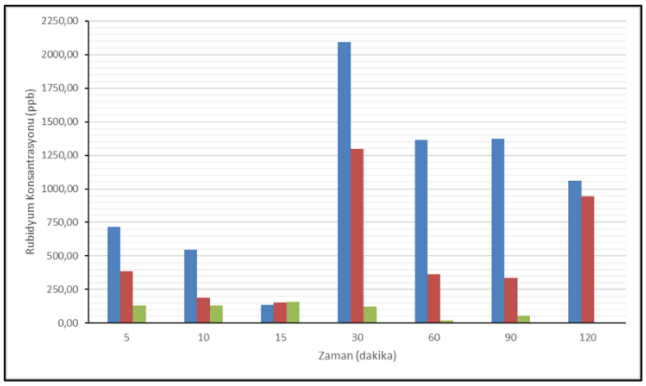
Bor cevher atığına ağırlıkça 5:5:5 (atık:$CaSO_4.2H_2O$:$CaCO_3$) oranlarında ilave edilen karışımlar incelendiğinde diğer karışım oranlarından daha düşük miktarda rubidyumun çözeltiye geçtiği belirlenmiştir. 800°C kavurma sıcaklığında en yüksek rubidyum konsantrasyonuna 90 dakika kavurma süresinde (742,06 ppb), 850°C kavurma sıcaklığında 60 dakika kavurma süresinde (1035,61 ppb) ve 900°C kavurma sıcaklığında ise 120 dakika kavurma süresinde (898,28 ppb) elde edilmiştir.



Şekil 4. Çözeltideki Rubidyum konsantrasyon miktarları (a: 800°C;b:850°C;c:900°C;Turuncu:5:1:1(atık:$CaSO_4.2H_2O$:$CaCO_3$); Turkuaz: 5:1,5:1,5 (atık:$CaSO_4.2H_2O$:$CaCO_3$); Mor: 5:2:2 (atık:$CaSO_4.2H_2O$:$CaCO_3$); Bordo: 5:5:5 (atık:$CaSO_4.2H_2O$:$CaCO_3$))

Her üç sıcaklıkta da en düşük karışım oranında (5:1:1) en yüksek rubidyum konsantrasyonunun tespit edilmesi üzerine katkısız ısıl işleme maruz kalmanın rubidyumun çözeltiye geçme miktarını nasıl etkilediğini belirlemek amacıyla aynı sürelerde ve katkısız olarak kalsinasyon çalışması yapılmıştır. Bu sürelerde (30, 60, 90 ve 120 dakika) ısıl işleme maruz kalan numuneler arasında en yüksek çözeltiye geçen rubidyum miktarı 2092,47 ppb ile 30 dakikada yapılan kalsinasyon işlemi olmuştur. Ardından daha kısa sürede (5, 10 ve 15 dakika) kalsinasyon yapılması ve hiç ısıl işleme maruz kalmadan doğrudan su liçi yapılarak elde edilen rubidyum miktarları ile karşılaştırılmıştır. 30 dakikadan daha az süre kalsinasyona maruz bırakılan numunelerde rubidyum

miktarının oldukça az olduğu görülmüştür. Sıcaklığın artması ile de aynı şekilde rubidyum miktarı azalmıştır. Isıl işleme maruz bırakmadan doğrudan su liçi yapılan numunede ise rubidyum miktarının 126,34 ppb olduğu tespit edilmiştir. Katkısız sadece ısıl işleme maruz numunelerin rubidyum konsantrasyon miktarları Şekil 5'de verilmiştir.



Şekil 5. Katkısız kavurma sonrası çözeltideki Rubidyum konsantrasyon miktarları (Mavi: 800°C; Kırmızı: 850°C; Yeşil: 900°C)

Çöktürme Deneyleri

Farklı oranlarda katkılama yapılan ve katkısız bor cevher atığı örneklerinin farklı sıcaklıklardaki kavurma işleminden sonra su liçi yapılmıştır. Yapılan su liçi deneylerinden çözeltiye geçen en yüksek (konsantrasyonu 2092,47 ppb) rubidyum konsantrasyonuna sahip çözelti seçilmiştir. Bu çözeltide bulunan lityum miktarı ise 34138,33 ppb olduğu tespit edilmiştir. Lityumun karbonat formda çöktürülmesi amacıyla Na_2CO_3 ilave edilmiştir. Çözeltideki lityum konsantrasyonuna göre farklı konsantrasyonlarda (10 ppm, 50 ppm ve 100 ppm) hazırlanan sodyum karbonat çözeltisi 80°C'de damla damla ilave edilmiştir. Kontrollü olarak reaksiyon süresi 72 saate kadar uzatılmasına rağmen lityum karbonat formunda çöktürülememiştir. 3'er tekrarlı olarak yapılan deneylerde sonuç değişmemiş ve çöktürme yapılamamıştır.

Çözeltide bulunan rubidyumu çöktürmeden önce çözeltinin 11 olan pH'sını 5,5 – 6,5 aralığına getirebilmek amacıyla oda sıcaklığında 0,1 M HCl damla damla çözeltiye ilave edilmiştir. pH değerinin bu aralığa getirilmesindeki amaç Al ve Fe gibi safsızlıkların çöktürülmesi olmasına rağmen çöken hiçbir ürün olmamıştır. Daha sonra rubidyumu karbonat formunda çöktürebilmek amacıyla amonyum karbonat ilave edilmiştir. Literatürde amonyum karbonat miktarı ile ilgili net bir bilgi olmadığından dolayı amonyum karbonat miktarı çözeltide bulunan rubidyum miktarına uygun olacak şekilde tercih edilmiştir. Çözeltideki rubidyum miktarının 2 ppm (2092,47 ppb) olması nedeniyle 1 ppm, 5 ppm, 10 ppm, 50 ppm ve 100 ppm amonyum karbonat çözeltileri hazırlanmıştır. Çözelti sıcaklığının 10°C'nin altında kalması için buz aküleri kullanılmıştır. Her bir çözelti için amonyum karbonat çözeltileri rubidyumca zengin olan çözeltiye damla damla ilave edilmiştir. Her çalışma üç tekrarlı yapılmıştır. Bu deneysel çalışma süresi de 72 saate kadar uzatılmasına rağmen rubidyum karbonat çöktürülememiştir.

Tartışma

Bor cevher atığında bulunan 135,9 ppm rubidyumun kazanılması amacıyla kavurma ve su liçi yöntemleri birbiri ardına kullanılmıştır. Kavurma sıcaklıkları bor cevher atığının termal gravimetrik analizi (Şekil 3) sonucuna göre karbonatlı bileşiklerin uzaklaştırılması ve kütle kaybının stabil hale geldiği 750°C'nin üzerinde 800°C, 850°C ve 900°C sıcaklıklarında tercih edilmiştir. Kavurma süreleri ise katkılı olan numunelerde 30, 60, 90 ve 120 dakika iken katkısız olan çalışmalar 5, 10, 15, 30, 60, 90 ve 120 dakika olarak yapılmıştır.

Katkı maddelerinin miktarları açısından sonuçlar incelendiğinde 800°C sıcaklıkta 90 dakika kavurmada 1590,90 ppb rubidyumun çözeltiye geçtiği belirlenmiştir (Şekil 4.a). Bu değer ise 5:1:1 (atık:$CaSO_4.2H_2O$:$CaCO_3$) katkı madde oranında hazırlanan numunede görülmüştür. Aynı kavurma süresinde diğer sıcaklıklarda ve aynı katkı oranına sahip numunelerdeki çözeltiye geçen rubidyum konsantrasyonu 850°C sıcaklıkta 1800,77 ppb iken 900°C sıcaklıkta 1322,01 ppb olarak tespit edilmiştir (Şekil 4.b ve Şekil 4.c).

Katkı maddelerinden bağımsız olarak sadece kavurma süresine bağlı olarak rubidyumun çözeltiye geçmesi incelendiğinde 800°C sıcaklıkta 90 dakika kavurmada 1590,90 ppb rubidyum, 850°C sıcaklıkta 60 dakika kavurmada 1847,79 ppb rubidyum ve 900°C sıcaklıkta 30 dakika kavurmada 1811,97 ppb rubidyum çözeltiye geçmiştir.

Katkı maddeleri ilave etmeden sadece kavurma sıcaklığı ve kavurma süresine bağlı olarak en yüksek rubidyum konsantrasyonuna sahip olan çözelti 800°C sıcaklıkta 30 dakika kavurmada 2092,47 ppb olarak tespit edilmiştir (Şekil 5). XRF analizinde tespit edilen 135,9 ppm miktarındaki rubidyumun söz konusu çalışma kapsamında yapılan deneysel prosedürde yaklaşık %1,5 oranında çözeltiye geçtiği tespit edilmiştir.

Zhou vd. (2015) kaolin kil atıklarında bulunan yaklaşık 2080 ppm olan rubidyumu 900°C sıcaklıkta ve 30 dakika uygulamış ve %93.4 oranında çözeltiye geçmesini sağlamıştır [15]. Yan vd. (2012), lepidolitten lityum elde etmek amacıyla belirli oranlarda NaCl ve $CaCl_2$ ile karıştırmış ve 880°C'de elde edilen rubidyum verimliliğinin %93,60 olduğu rapor etmişlerdir. Kalsiyum klorür ve sodyum klorür karışımının erime noktası, her iki klorlama maddesinin tek başına erimesinden daha düşüktür, bu da klorür eriyiğinin akışkanlığını arttırır ve sıvı fazın viskozitesini azaltır. Yani kalsiyum klorür ve sodyum klorür karışımı lepidolitin yüzeyinde bir yeterli bir difüzyon sağlayarak lityum ekstraksiyonunu kolaylaştırabileceğine vurgu yapmışlardır [4]. Benzer özelliklere sahip olmakla birlikte rubidyumun da çözeltiye geçme oranının yüksek olduğu ön görülmüştür. Liu vd. (2022), lityum minerali olan lepidolitten rubidyum kazanma amacıyla 800°C'de 5 ve 2 saatlik iki aşamalı kavurma işlemi uygulamış ancak sonrasında 5 aşamalı kimyasal yöntemi kullanmışlardır [38]. Söz konusu çalışamda yapılan kavurma sıcaklığının literatür ile uyum sağladığı görülmüştür.

Lityum kaynağı olan lepidolitten lityumu kazanmak amacıyla Yan vd. (2012) klorlama kavurması yaparken [4], Zhang vd.

(2019) sülfirik asit ile kavurma işlemi [17] yapmıştır. Rubidyum, birçok çalışmada lityum kazanılmaya çalışırken elde edilmiştir. Önceki çalışmalarımızda bor cevher atığında bulunan lityumu sülfat formuna getirilmesini ve kolayca sulu ortamda kalmasını sağlamak amacıyla ağırlıkça 5:1:1, 5:1,5:1,5, 5:2:2 ve 5:5:5 (atık:$CaSO_4.2H_2O$:$CaCO_3$) oranlarında katkı maddeleri ilave etmiştik [34]. Bor cevher atıklarından elde edilen en yüksek lityum konsantrasyonu 5:2:2 (atık:$CaSO_4.2H_2O$:$CaCO_3$) oranında 900°C sıcaklıkta kavurma yapılan örnekte 1099,88 ppm (%97,16) tespit edilmişti. Bu nedenle söz konusu çalışmada aynı katkı maddeleri ilave edilmiş ve bu koşullarda kavurma işlemi yapılmış ve ardından su liçi işlemine tabi tutulmuş çözeltide 25,12 ppb miktarda rubidyum bulunduğu görülmüştür.

Katkı maddeleri ilave edilmemiş ve ilave edilmiş şekilde aynı ısıl işleme maruz kalan örneklerin çözelti içerisinde bulunan rubidyum miktarlarının karşılaştırılması da yapılmıştır. Bor cevher atığına 5:1:1 (atık:$CaSO_4.2H_2O$:$CaCO_3$) oranında 850°C sıcaklıkta ve 60 dakika kavurma süresinde çözeltiye geçen rubidyum miktarı 184,79 ppb iken katkı maddesi ilave edilmemiş numunenin 800°C sıcaklıkta ve 30 dakika ısıl işleme maruz kalmasıyla daha yüksek miktarda (2092,47 ppb) rubidyum çözeltide tespit edilmiştir. Hiçbir ısıl işleme tabi tutulmadan aynı koşullarda su liçi yapıldığında ise rubidyum miktarı 126,34 ppb ölçülmüştür. Bu çalışmada kullanılan bor cevher atığı için katkı maddelerinin rubidyum kazanımında etkili bir rol oynamadığı tespit edilmiştir. Başka bir deyişle bor cevher atığına katkı maddesi ilave edilmeden, daha düşük sıcaklıkta ve daha kısa sürede daha yüksek miktarda rubidyum çözeltiye alınabildiği görülmüştür.

Ayrıca rubidyum kaynaklarının farklı yapılarda ve kimyasal kompozisyonlara sahip olması nedeniyle çeşitli kazanım farklılıkları ortaya çıkmıştır.

Bu çalışmada bor cevher atıklarından rubidyumun kazanımı amacıyla kullanılan kavurma işlemi ardından su liçi ve sonrasında yapılan rubidyumu karbonat formunda çöktürme işlemlerinden elde edilmesi bu koşullar altında mümkün olmamıştır.

Sonuçlar

Ülkemizde rubidyum kazanılması ile ilgili yeterli çalışmaya rastlanılmamış, literatür çalışmalarında ise rubidyumun, lityum içeren cevher yataklarında bulunduğu görülmüştür. Ülkemizde de lityum kaynağı olarak bor cevher yataklarında, bor cevher atıklarında, jeotermal suların olduğu bölgelerde lityumun varlığı bilinmektedir. Bu nedenle rubidyum elde etmek amacıyla bor cevher atıkları ham madde olarak tercih edilmiştir. Ancak kullanılan deneysel yöntemin atıktan rubidyumun kazanılmasında yeterli olmadığı görülmüştür. Bor cevher atığında bulunan 135,9 ppm rubidyumun yaklaşık %1,5 oranında çözeltiye alınması mümkün olmuştur. Kavurma işleminde ilave edilen katkı maddelerinin rubidyum kazanımında yeteri kadar etkili olmadığı görülmüştür.

Bor cevher atıklarından rubidyumun kazanılması amacıyla solvent ekstraksiyonu ve iyon değişimi yöntemleri ile daha ayrıntılı çalışmalar yapılabilir. Ayrıca özel membran sistemleri ile de seçimli kazanımı mümkün olabileceği ön görülmektedir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yazar Katkıları

Ayşegül Yücel: Kavramsallaştırma, biçimsel analiz; metodoloji, yazma-özgün taslak, görselleştirme, araştırma, denetim, proje yönetimi.

Musa Sarıkaya: Yazma-inceleme ve düzenleme, denetim, biçimsel analiz, danışman.

Teşekkür

Tüm yazarlar **TÜBİTAK 1002** A – Hızlı Destek Modülü Programına (**Proje No: 122M910**) finansal destekleri ve Eti Maden İşletmeleri Eskişehir Kırka Bor İşletme Müdürlüğü'ne numune temini sağladığı için teşekkür eder.

Kaynaklar

[1] H. Su et al., "Lithium recovery from lepidolite roasted with potassium compounds," Miner Eng, vol. 145, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.mineng.2019.106087.

[2] N. Vieceli, C. A. Nogueira, M. F. C. Pereira, F. O. Durão, C. Guimarães, and F. Margarido, "Optimization of Lithium Extraction from Lepidolite by Roasting Using Sodium and Calcium Sulfates," Jan. 2017, Taylor and Francis Inc. doi: 10.1080/08827508.2016.1262858.

[3] T. Ncube, H. Oskierski, G. Senanayake, and B. Z. Dlugogorski, "Two-Step Reaction Mechanism of Roasting Spodumene with Potassium Sulfate," Inorg Chem, vol. 60, pp. 3620–3625, Mar. 2021, doi: 10.1021/acs.inorgchem.0c03125.

[4] Q. X. Yan et al., "Extraction of lithium from lepidolite using chlorination roasting-water leaching process," Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition), vol. 22, pp. 1753–1759, Jul. 2012, doi: 10.1016/S1003-6326(11)61383-6.

[5] B. Swain, "Recovery and recycling of lithium: A review," Jan. 2017, Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.seppur.2016.08.031.

[6] X. Zhang, T. Aldahri, X. Tan, W. Liu, L. Zhang, and S. Tang, "Efficient co-extraction of lithium, rubidium, cesium and potassium from lepidolite by process intensification of chlorination roasting," Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, vol. 147, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.cep.2019.107777.

[7] Y. Liu, B. Ma, Y. Lv, C. Wang, and Y. Chen, "Thorough extraction of lithium and rubidium from lepidolite via thermal activation and acid leaching," Miner Eng, vol. 178, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.mineng.2022.107407.

[8] H. Guo, M. Lv, G. Kuang, Y. Cao, and H. Wang, "Stepwise heat treatment for fluorine removal on selective leachability of Li from lepidolite using HF/H2SO4 as lixiviant," Sep Purif Technol, vol. 259, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.seppur.2020.118194.

[9] G. D. Rosales, E. G. Pinna, D. S. Suarez, and M. H. Rodriguez, "Recovery process of Li, Al and Si from lepidolite by leaching with HF," Minerals, vol. 7, Mar. 2017, doi: 10.3390/min7030036.

[10] H. dong Wang, A. an Zhou, H. Guo, M. hua Lü, and H. zhao Yu, "Kinetics of leaching lithium from lepidolite using mixture of hydrofluoric and sulfuric acid," J Cent South Univ, vol. 27, pp. 27–36, Jan. 2020, doi: 10.1007/s11771-020-4275-4.

[11] J. Mulwanda, G. Senanayake, H. Oskierski, M. Altarawneh, and B. Z. Dlugogorski, "Leaching of lepidolite and recovery of lithium hydroxide from purified alkaline pressure leach liquor by phosphate precipitation and lime addition," Hydrometallurgy, vol. 201, May 2021, doi: 10.1016/j.hydromet.2020.105538.

[12] Y. Lv et al., "Efficient Extraction of Lithium and Rubidium from Polylithionite via Alkaline Leaching Combined with Solvent Extraction and Precipitation," ACS Sustain Chem Eng, vol. 8, pp. 14462–14470, Sep. 2020, doi: 10.1021/acssuschemeng.0c04437.

[13] P. K. Choubey, M. S. Kim, R. R. Srivastava, J. C. Lee, and J. Y. Lee, "Advance review on the exploitation of the prominent energy-storage element: Lithium. Part I: From mineral and brine resources," Apr. 2016, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.mineng.2016.01.010.

[14] L. I. Barbosa, G. Valente, R. P. Orosco, and J. A. González, "Lithium extraction from β-spodumene through chlorination with chlorine gas," Miner Eng, vol. 56, pp. 29–34, 2014, doi: 10.1016/j.mineng.2013.10.026.

[15] L. Zhou, T. Yuan, R. Li, Y. Zhong, and X. Lei, "Extraction of rubidium from kaolin clay waste: Process study," Hydrometallurgy, vol. 158, pp. 61–67, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.hydromet.2015.10.010.

[16] B. Ertan and Y. Erdoğan, "EMET - ESPEY BÖLGESİNDEKİ BORLU KİLLERDE ESER ELEMENT TAYİNİ," https://dergipark.org.tr/en/pub/dpufbed/issue/35917/403298.

[17] X. Zhang, X. Tan, C. Li, Y. Yi, W. Liu, and L. Zhang, "Energy-efficient and simultaneous extraction of lithium, rubidium and cesium from lepidolite concentrate via sulfuric acid baking and water leaching," Hydrometallurgy, vol. 185, pp. 244–249, May 2019, doi: 10.1016/j.hydromet.2019.02.011.

[18] C. Xu, J. Wang, and J. Chen, "Solvent Extraction of Strontium and Cesium: A Review of Recent Progress," Solvent Extraction and Ion Exchange, vol. 30, pp. 623–650, Oct. 2012, doi: 10.1080/07366299.2012.700579.

[19] V. N. Romanovskiy et al., "The universal solvent extraction (unex) process. i. development of the unex process solvent for the separation of cesiumstrontium and the actinides from acidic radioactive waste," Solvent Extraction and Ion Exchange, vol. 19, pp. 1–21, 2001, doi: 10.1081/SEI-100001370.

[20] R. A. Leonard et al., "Development of a solvent extraction process for cesium removal from SRS tank waste," Sep Sci Technol, vol. 36, pp. 743–766, 2001, doi: 10.1081/SS-100103618.

[21] D. E. Horner, K. B. Brown, D. J. Crouse, and B. Weaver, "RECOVERY OF FISSION PRODUCTS FROM WASTE SOLUTIONS BY SOLVENT EXTRACTION," Dec. 1963. doi: 10.2172/4122516.

[22] Z. Li, Y. Pranolo, Z. Zhu, and C. Y. Cheng, "Solvent extraction of cesium and rubidium from brine solutions using 4-tert-butyl-2-(α-methylbenzyl)-phenol," Hydrometallurgy, vol. 171, pp. 1–7, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.hydromet.2017.03.007.

[23] S. M. Liu, H. H. Liu, Y. J. Huang, and W. J. Yang, "Solvent extraction of rubidium and cesium from salt lake brine with t-BAMBP-kerosene solution," Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition), vol. 25, pp. 329–334, Jan. 2015, doi: 10.1016/S1003-6326(15)63608-1.

[24] W. S. Chen, C. H. Lee, Y. F. Chung, K. W. Tien, Y. J. Chen, and Y. A. Chen, "Recovery of rubidium and cesium resources from brine of desalination through t-BAMBP extraction," Metals (Basel), vol. 10, May 2020, doi: 10.3390/met10050607.

[25] Q. Zeng, S. Li, W. Sun, L. Hu, H. Zhong, and Z. He, "Eco-friendly leaching of rubidium from biotite-containing minerals with oxalic acid and effective removal of Hg2+ from aqueous solution using the leaching residues," J Clean Prod, vol. 306, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127167.

[26] P. Xing, C. Wang, Y. Chen, and B. Ma, "Rubidium extraction from mineral and brine resources: A review," Aug. 2021, Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.hydromet.2021.105644.

[27] E. H. Christiansen, M. G. Best, and J. Radebaugh, "The origin of magma on planetary bodies," in Planetary Volcanism across the Solar System, Elsevier, 2021, pp. 235–270. doi: 10.1016/B978-0-12-813987-5.00006-7.

[28] W. C. Butterman and R. G. Reese, "Mineral Commodity Profiles -- Rubidium," 2003. doi: 10.3133/ofr0345.

[29] V. T. Luong, D. J. Kang, J. W. An, D. A. Dao, M. J. Kim, and T. Tran, "Iron sulphate roasting for extraction of lithium from lepidolite," Hydrometallurgy, vol. 141, pp. 8–16, 2014, doi: 10.1016/j.hydromet.2013.09.016.

[30] V. T. Luong, D. J. Kang, J. W. An, M. J. Kim, and T. Tran, "Factors affecting the extraction of lithium from lepidolite," Hydrometallurgy, vol. 134–135, pp. 54–61, 2013, doi: 10.1016/j.hydromet.2013.01.015.

[31] L. H. Kalenowski, Recovery of lithium from spodumene-amblygonite mixtures / by L.H. Kalenowski and S.M. Runke. 1952 [Leather Bound] : Kalenowski L. H.: Amazon.com.tr: Kitap, vol. 4863. 1952.

[32] P. Taborga, I. Brito, and T. A. Graber, "Effect of additives on size and shape of lithium carbonate crystals," J Cryst Growth, vol. 460, pp. 5–12, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.jcrysgro.2016.12.001.

[33] Y. Wang, S. Du, X. Wang, M. Sun, Y. Yang, and J. Gong, "Spherulitic growth and morphology control of lithium carbonate: the stepwise evolution of core-shell structures," Powder Technol, vol. 355, pp. 617–628, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.powtec.2019.07.061.

[34] A. Yücel, "Bor Cevher Atıklarından Lityum Titan Oksit Üretiminin Araştırılması," Doktora, Fen Bilimleri, Malatya, 2022.

[35] P. Xing, C. Wang, Y. Chen, and B. Ma, "Rubidium extraction from mineral and brine resources: A review," Aug. 2021, Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.hydromet.2021.105644.

[36] A. Yücel, M. Sarıkaya, H. Ç. Yılmaz, and T. Depci, "Extraction of lithium from boron ore wastes and precipitation as lithium carbonate," Canadian Metallurgical Quarterly, 2025, doi: 10.1080/00084433.2025.2471612.

[37] "Fact box," https://periodic-table.rsc.org/element/37/rubidium.

[38] Y. Liu, B. Ma, Y. Lv, C. Wang, and Y. Chen, "Selective recovery and efficient separation of lithium, rubidium, and cesium from lepidolite ores," Sep Purif Technol, vol. 288, May 2022, doi: 10.1016/j.seppur.2022.120667.

Dicle University
Journal of Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/dumf
duje.dicle.edu.tr

Research Article

Determining the Overflow of Kalecik Basin Using Fuzzy SMRGT Method

Fatih Şevgin[1*], Zeynel Fuat Toprak[2], İskender Dölek[3]

[1] Muş Alparslan University, Vocational School of Technical Sciences, f.sevgin@alparslan.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1984-8162
[2] Dicle University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Division of Hydraulics, toprakzf@dicle.edu.tr, ORCID: 0000-0003-0876-1165
[3] Muş Alparslan University Faculty of Education Turkish and Social Sciences Education Department Social Sciences Education Department, i.dolek@alparslan.edu.tr, ORCID: 0009-0009-8822-9937

ARTICLE INFO

Article history:

Received 31 October 2024
Received in revised form 14 April 2024
Accepted 23 May 2025
Available online 30 June 2025

Keywords:

flood, fuzzy logic, kalecik basin, rational method

DOI: 10.24012/dumf.1576837

* Corresponding author

ABSTRACT

Floods have always been an important issue and have caused great losses of life and property in human history with their hydrological and hydraulic aspects. Excessive urbanization, increases flows into a basin or region, in other words, increase the flow coefficient. Also, the reduction in stream sections by converting streambeds into habitats causes an increase in human-induced floods. Additionally, when the effects of global climate change, the increased extreme meteorological events (i.e. heavy rains), and the temporal and spatial changes of these extreme events are considered, the flood risk is increasing for almost every region and basin. Measures must be taken to prevent flood, which is a natural event, from turning into a disaster. To take precautions, floods must be predicted in advance as accurately as possible. Since some natural events such as earthquakes are difficult to predict, it is also difficult to prevent them from turning into disasters. However, floods are relatively easy to predict. The literature on this subject is quite old. On the other hand, the methods proposed in the current literature are either classical methods of old technology and have low predictive power, or they are black-box methods that do not rely on a physics cause-effect relationship, and for this reason, do not give enough confidence. Relatively better ones also have some disadvantages as well as advantages. In the present study, a fuzzy model has been developed to estimate the flow rate. To construct the membership functions and to generate the fuzzy rules of the model the SMRGT method, which novel in literature, have been used. On the other hand, the main advantage of SMRGT makes estimation with physical cause - effect relationship (not only based on the data at hand). As results, the flow coefficient has been determined particularly for Kalecik Basin as an application. Furthermore, a flood risk map obtained for the same Basin. It can be concluded that the fuzzy SMRGT can be used for this aim and it gives more precious and realistic results compared with the conventional methods.

Introduction

Water resources have vital importance for all living beings. However, constantly increasing excessive and unplanned urbanization, irrigated agriculture, global climate changes, population growth, industrialization, and environmental pollution are important factors causing pollution and insufficiency of water resources. Because of the heterogeneous distribution of all water resources and precipitation in both temporal and spatial terms, some basins or regions have water scarcity, while others have excessive water. As a result of excessive precipitation, many floods occur in hydrological terms. Knowingly or unknowingly, people destroyed and reduced natural and untouched places in our globalizing world with each passing day. Humans transform natural events into disasters by interfering with the balance of nature, and for this reason, the loss of life and property because of disasters is increasing. The construction of roads, tunnels, mines, dams, and similar gigantic structures in the world where mountains play roles in balance now brings the risk of disrupting this balance.

Natural events with a high potential to turn into disasters can be listed as earthquakes, floods, landslides, fires, hurricanes, storms, avalanches, volcanic eruptions, etc. The role of humans in the triggering of natural events and their transformation into disasters and the deterioration of the natural balance is very great. In the past, human beings, who established settlements in areas that were close to the water edges, did not interfere much with the soil structure and permeability of the ground. However, developing metropolitan cities, rising buildings, widening asphalt roads, and similar interventions have increased a lot in today's world. A waterway (streambed morphology), which was eroded by a stream that flowed throughout history, is increased or decreased in depth or width by human hands today. This causes the water to overflow from the streambed also causing a flood to occur. Earthquakes rank first in the loss of life and property caused by natural disasters on a global scale, while floods take second place [1].

To prevent floods partially or completely, or take measures against them, they must first be accurately estimated, risk maps must be created, and temporal variations of such a risk must be determined. For this purpose, models developed with statistical and black-box methods and artificial intelligence (Artificial Neural Networks, Genetic Algorithm, etc.) techniques, which are generally merely databases and used widely today, are generally valid only for whichever basin or region they are generalized to. In other words, they cannot be generalized any further [2].

However, physics-based models have the characteristic of being generalizable for almost every basin. In the present work, the overflow debit in any basin, the contour map of the debit, and the settlements that may be affected by overflows were determined using the Rational Method.

Floods cause losses of life and property damaging the environment considerably. It is the natural events that turn into disasters causing the most losses of life and property after earthquakes at the global level. Also, it is a type of disaster with serious social and cultural damage. One of the most important details distinguishing overflows from floods is that although floods bring large piles of stones and unproductive soil with them from places with sloping topography, overflows carry fertile soils since they remove the surface soil. Especially, the increased groundwater in the basin, the fertile soil, and minerals brought with it by the overflows increase the productivity required for agriculture, the overflows that come at regular intervals in arid or semi-arid areas are essential for the creatures living there, and they carry some nutrients necessary for aquatic creatures to the rivers and lakes, which are some of the benefits of overflows [3]. Akay and Baduna Koçyiğit reported that although overflows play very beneficial roles for hydrological and biochemical aquifer recharge, sediment, and nutrient transport, they are still natural disasters that cause losses of life and property during a year [4]. Although Akay and Baduna Koçyiğit refer to overflows as a "natural disaster", this statement is not considered correct and it must be noted that it is more correct to say "natural event that turns into a disaster". Trend analyses regarding natural disasters show that flood events and their damages have increased in recent years [5]. The floods occurring in five cities in the Western Black Sea region in May 1998 affected approximately 2 million people and caused 30 people to die, 151 streams and rivers to overflow their beds, and 478 houses to be completely submerged [6]. Also, in the overflow disasters between 2002 and 2013, Turkey suffered a financial loss of 867 million US Dollars in total. Since 1980, there has been an increase in the frequency of water-based natural disasters around the world, and therefore, serious attention and concentration on scientific studies on overflows and floods [7]. The water disasters that happened in Europe between 1998 and 2004 correspond to 43% of all natural disasters. The 100 major floods occurring during these years caused the death of 700 people in Europe, the displacement of half a million people from their homes, and the economic loss of approximately 25 billion Euros [8]. According to the emergency disaster data on an international scale between 1900 and 2008, 2238 floods occurred on a global scale, approximately 2 billion people were affected, nearly 3 million people lost their lives, and a loss of more than 200 billion US dollars occurred [9]. When the average of the years 2005-2015 is taken around the world, nearly 183 million people were affected by natural disasters (overflows, floods, earthquakes, etc.) every year and an average of 83 thousand people lost their lives [10]. Based on the above data, the prediction of overflows is very important both in terms of protection from the damage of overflows and benefiting from what they bring. By using the stochastic method, the overflow rates of the Bird Stream in Oklahoma and the Salt River in Arizona with Markov Chains [11]. These processes, which are called stochastic processes, are usually probability models varying according to time and space. Non-generalizability is common in such processes.

Stronska et al. made the hydrological modeling of a 500 km long area by using the MIKE 11 NAM package program and the deterministic approach. In the modeling, the precipitation data that were measured at 92 stations surrounded by the Odra River in the Wroclaw basin in Poland were used. Also, in the same study, the flood extent of the basin with an area of 49.000 km^2 was determined 2D by using MIKE FLOOD WATCH [12]. Later, Irfan et al. used the same model in the measurements in the Uğrak Basin of Tokat which has a 7 km^2 area, and reported that the model did not yield the desired output due to the excessive input variables, which could not reflect the basin completely [13]. Barbero et al. performed a flood modeling with MIKE FLOOD WATCH by using a total of 70 flow meters and 200 precipitation measurement stations in the Po river basin, which has an area of 37.000 km^2 in the Piemonte Region of Italy. The measurements were made in 50 regions for approximately 48 hours and these values were integrated into the values that were calculated with the MIKE 11 NAM Module [14].

Seçkin et al. presented a model to predict annual maximum flow values based on area, latitude, longitude, elevation, and recurrence periods by using black-box methods. Artificial Neural Networks were used for modeling and the West Black Sea Basin was chosen as the study area. The authors, who used Multiple Linear Regression (MLR) and Multiple Nonlinear Regression (MNLR) methods for the same purpose, also compared the results. They concluded that the MLR model yielded distant predictions in the test stage compared to the ANN model and that the success of the ANN model for calculating flood flow in the future is better than the performance of MLR and MLR [15]. However, based on our opinions, since these methods are Black Box methods, their relative success or failure cannot yield adequate confidence.

Burgan and Icaga, who approached the events with synthetic methods, chose the Akarçay basin as the study area for their article using different methods (Regression, Mockus, and SCS) for the calculations of the debits of overflows. He also made the flood routing calculation in the computer medium, prepared the 3D visual results, and examined the situation of the basin creating videos of time-dependent overflow simulations dynamically [16]. Like Burgan and Icaga, Ozkoca et al. brought a different perspective to the synthetic methods D.S.I and Mockus. The authors reported that the Mockus Method gave results that are more meaningful in areas of 5-60 km^2 showing the D coefficient used in this method, which is the main source of the flooding, as precipitation time. For the D.S.I. synthetic method, they argued that the results in areas that were smaller than 60 km^2 were greater than the expected values [17].

Aşıkoğlu used the 24-hour annual maximum precipitation intensities of six precipitation stations, which were the most suitable for studies among 23 stations in the Aegean Region with statistical methods in overflow calculations. The author stated in his study that he also used four statistical methods in total and that the robust statistics method yielded close results to the other three methods (MLM, MOM, PWM). He also argued that the robust statistics method yielded values closer to the truth than other variable analysis methods emphasizing the necessity of producing and analyzing synthetic data to evaluate the performance of the method more clearly [18]. On the other hand, Gülbaz et al, who used all of the three statistical, synthetic, and deterministic methods in their study and made comparisons, also made overflow calculations on the Alibeyköy basin. In this study, they reported the results of the statistical methods Log-Normal III and Log-Pearson III trials to be small for 50-year overflows. In the Mockus and SCS analyses, which are synthetic methods, it was found that the values in the Mockus Method were extremely high, especially from the 50 and 100-year overflow rates. The authors concluded that the results in MIKE 11 NAM analysis, which is a deterministic method, were larger than those of the statistical methods but smaller than synthetic methods [19]. For this reason, the authors' approaches to overflows were given above from 5 different perspectives, namely stochastic, deterministic, black box, synthetic and statistical, and were discussed separately and given in detail.

The Methods

To minimize the economic and social damages of overflows, it is very important to determine the overflow size accurately. The purpose for which overflow calculations will be made is important for determining the dimensions of the hydraulic structures to be designed. Although it is adequate to know the values of the overflow peak flow rates in the project designed for the construction of a bank or canal, it is also important to know the volume in the design of the spillway or overflow trap. Solving this issue with a single discipline, namely, instead of merely finding the overflow flow rate, taking an interdisciplinary approach and determining the areas that might be affected by overflows with a map will yield more accurate, clearer, and more reliable results. When the flow coefficient known, well known, empirical (i.e., The Rational Method and The Mc. Math Method), synthetic (i.e., The Mockus Method, The S.C.S Method, The DSI Synthetic Method, and The Synder Method) or any other classical (statistical or deterministic) methods are employed in overflow calculations. However, for all methods the flow coefficient is needed. Therefore first, flow coefficient must be correctly determined. It is well known that the researchers do not calculate or determine this coefficient, mainly it is obtained from the literature. In this study, different from the previous, flow coefficient is determined by using SMRGT. The above-mentioned methods used for overflow are welknown so they are not explaned in detail [20-49], however since SMRGT is new the calculation steps of this method presented. Here, six methods, two of which are empirical and four of which are synthetic, widely used, and not directly data-based, are explained briefly. Statistical methods are not mentioned here because they are considered data-based merely. Because, in case of incomplete or lack of precipitation-flow data, empirical or synthetic unit hydrograph methods are preferred for use [50].

It was determined that the flow coefficient (C) varies between 0 and 1 in the literature and was calculated in advance for many regions or basins and is included in the literature or the database of relevant institutions in tables. According to these tables, it is seen that the flow coefficient is determined through different variables e.g. the settlement status, the type of coating, and the variables that depend on the territory. Practitioners employ the flow coefficient values in the tables without questioning most of the time. Depending on the development of technology and novel and more sensitive methods on the subject, it is useful to update these coefficients. For this reason, using the values directly from the tables may not yield healthy results. The flow coefficient depends on many factors e.g. the location of each basin, geomorphological condition, climatic conditions, and drainage network in the area. The flow coefficient that is found with the fuzzy SMRGT Method for the Kalecik Basin was 0.28 [35]. This coefficient will be used in the rational method of overflow calculations.

Empirical Methods

The Rational Method

This method is employed in basins where observation data are not available, in calculating peak flow rates from small streams, in estimating rain and sewage flow rates in cities and in sizing water transfer facilities e.g. trench bridges and culverts. In this method, it is assumed that the flow coefficient does not change in time and the precipitation is distributed uniformly throughout the entire basin. The basin size is taken as the basis of the usage criterion in the method. The area range where the method is employed in DSI studies varies between 0.5 and 5 km^2 [51].

In this method, the maximum flow rate is calculated as follows;

$$Q = C \times i \times A \quad (1)$$

Here;

Q: Overflow debit (m^3 / s)

C: Basin flow coefficient (without dimension)

i: Rainfall intensity (m/s)

A: Basin area (m^2)

One of the disadvantages of this method is that the basin area is limited to 0.5 to 5 km^2, and the second is that the precipitation duration must be greater than the basin transition period. However, it must also be noted that the method has different application areas in practice.

The Mc. Math Method

This method yields good results on flat terrain of almost any size, especially in surface drainage channel sizing, and must not be applied to streams fed from steep slopes [50].

$$Q = 0.0023 \times C \times I \times S^{\frac{1}{5}} \times A^{\frac{4}{5}} \quad (2)$$

Here;

Q: Flood flow (m^3/s)

C: A coefficient depending on the topography, vegetation, and soil type

I: Rainfall intensity (mm/h)

S: Bed slope x 1000

A: Basin drainage area (m^2)

Synthetic Methods

The Mockus Method

Although this method is a kind of unit hydrograph, it is preferred because of its practicality in calculation and ease of drawing the triangular hydrograph. To apply the method, the collection time Tc must be less than 30 hours and the basin area must be less than 1000 km^2 [52].

Peak flow per unit area of the basin is calculated as;

$$Q_p = K \times A \times \frac{h_a}{T_p} \quad (3)$$

Here;

Q_p: Unit hydrograph flow rate ($m^3 / s/mm$)

K: Coefficient of the basin

A: Basin area (km^2)

h_a: Unit hydrograph depth (mm)

T_p: Time to reach the peak (hours)

The S.C.S Method

The method employed by DSI in Turkey is also called the Flow Curve Number. The United States Land Conservation Service (SCS) developed this method. A dimension-free unit hydrograph is used in drawing the synthetic unit hydrograph in the method [53]. It is generally preferred for sizing floodgates in water storage structures e.g. dams and ponds in basins smaller than 30 km^2. They are the structures that allow possible overflows or full floodgates to be transferred to downstream without causing any danger if ponds or dams are full. When calculating the peak flow rate of overflows, two-hour excess precipitation is taken into account [54].

According to this method;

$$Q_p = A \times h_a \times q_p \times 10^{-3} \quad (4)$$

Here;

Q_p: Peak flood flow rate ($m^3 / s/mm$) of two-hour excess precipitation

A: Basin area (km^2)

h_a: Surface flow height in the basin (mm)

q_p: The flow that will come from each square kilometer of the basin when the overflow reaches its peak value ($L / sn/km^2 / mm$).

The DSI Synthetic Method

Synthetic unit hydrographs are used to calculate overflow debit that may occur in basins where safe flow monitoring stations are not available. This method is used for basin areas up to 1000 km^2. When larger basin areas are in question, unit hydrographs are obtained by dividing areas smaller than 1000 km^2. If the Tp, namely, the unit hydrograph peak time, is less than 2 hours, the use of this method will not yield accurate results [55].

$$Q_p = q_p \times \quad (5)$$

Q_p: Total debit (m^3 / s)

q_p: Debit rate per unit area of 1 mm flow height ($m^3 / s/mm$)

A: Basin area (km^2)

$$q_p = 414(A^{0.225} \times E^{0.16}) \quad (6)$$

E is a parameter and is calculated as follows;

$$E = L \times \frac{Lc}{\sqrt{S}} \quad (7)$$

Here;

L: Main waterway length (km)

L_c: The waterway distance between the projection of the center of gravity of the basin on the main waterway and the exit point of the basin (km)

S: Basin harmonic slope (%)

The Synder Method

In drainage areas where precipitation flow records are not available, various physical characteristics of the basin are employed for calculating the unit hydrograph. For this reason, it is the most employed method among the proposed methods. Used in areas larger than 1000 km^2, this method is based on the principle of obtaining the unit hydrograph of the basin by using the unit hydrograph time, unit hydrograph delay time, peak consumption, and hydrograph width at 50% and 75% of the flood peak [56].

The rising time of the unit hydrograph is calculated with the following equation.

$$t_p = 0.75 \times C_t \times (L \times L_c) \quad (8)$$

Here;

t_p: Rising time of unit hydrograph ($hours$)

C_t : Coefficient depending on field conditions

L: Basin length (km)

L_c: The farthest distance from the center of gravity of the basin to the entrance or exit point of the basin in the form

C_t; It is taken at 0.35 in valleys, 0.72 in plains, and 1.2 in mountainous areas. The chosen C_t value is empirically multiplied by 0.89 for the peak value, and the C_t value is obtained.

$$C_p = 0.89 \times C_t \quad (9)$$

The heavy rain duration of the unit hydrograph t_r is calculated with the following formula.

$$t_r = \frac{tp}{5.5} \quad (10)$$

Here;

t_r: Heavy rain duration per unit hydrograph ($hours$)

The flood run-off (q_p) value at the peak of the overflow hydrograph is calculated with the following formula (lt/s/km^2/cm).

$$q_p = 2760 \times \frac{Cp}{tp} \quad (11)$$

Based on this, the flow rate (Qp) value at the overflow peak is;

$$= q_p \times A \times 10^{-3} \quad (12)$$

Here;

A: Basin area (km^2)

This value, which is calculated later, is multiplied by the rainfall height taken for 100 years (ha), and the overflow flow rate for 100 years is obtained.

Artificial Intelligence Methods

Fuzzy SMRGT Method

1. First, the decision is made for the current event's dependent and independent variables. Dependent variables are taken as input, and independent variables are taken as output. Herein, the dependent variable is flow coefficint and the independent variables are chosen as rainfall, evaporation, landuse/cover, and the mean basin slope.

2. All variables must have a specific limit range, and their minimum and maximum values must be known. Xmin and Xmax values must be chosen based on an expert's opinion. They must be expanded as desired, considering the problem's situation. The XR change interval is calculated as in Equation 13.

$$X_R = (X_{mak}) - (X_{min}) \quad (13)$$

Please see the variation interval of the variables particularly used in current study in Table 1.

3. The shape of the membership functions is decided. When defining the membership functions, choosing the right triangle or trapezoidal for the first and last and choosing the trapezoidal or isosceles triangle for the membership functions in the middle will be more efficient for the model. Herein all the fuzzy sets are chosen as triangular since this method gives more positive results on triangular and trapezoidal membership functions.

The key values of each variable (K1, K2, K3, ... Kn) unit width (UW), extended unit widths (EUW) symmetrically extended for each membership function, and two neighboring membership function's overlapping value (O) is determined. Also, the number of right triangles (nu) in Fuzzy triangular sets must be known (Figure 1). For example, for a membership function with five Fuzzy subsets in Figure 1, K1 and K5 are the values at the centroid of the first and last right triangles, and the remaining middle key values (K2-K4) are the centroids of the triangles in between (Ci-1, Ci, Ci+1). These magnitudes of the dependent and independent variables for the Fuzzy SMRGT model are calculated with equations 13-21 using the formulas below.

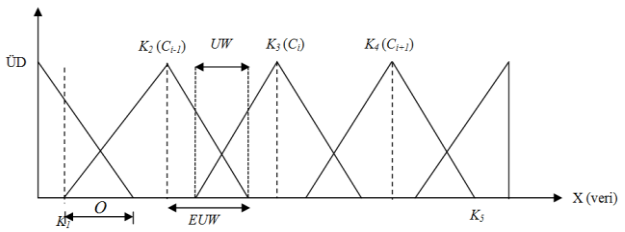


Figure 1. The notation of key value, core value, and unit width for the model

$$C_{i-1} = K_i = \frac{C_i - X_{min}}{2} + X_{min} \quad (14)$$

$$C_i = \frac{X_R}{2} + X_{min} \quad (15)$$

$$C_{i+1} = X_{mak} - \left(\frac{X_{mak} - K_i}{2}\right) \quad (16)$$

$$UW = \frac{X_R}{n_u} \quad (17)$$

$$O = \frac{UW}{2} \quad (18)$$

$$EUW = \frac{X_R}{n_u} + O \quad (19)$$

$$K_1 = X_{min} + \frac{EUW}{3} \quad (20)$$

$$K_5 = X_{max} - \frac{EUW}{3} \quad (21)$$

4. According to SMRGT, membership functions of all independent variables must consist of at least three fuzzy sets. If more clusters are selected, it must be an odd number. The model error decreases, and the processing volume increases as the number of fuzzy sets in membership functions increases. The number of the fuzzy sets are 5 for all independent variables.

5. Overlapping the right triangle parts of fuzzy sets up to the centroid (1/3 and 2/3) in membership functions reduces the error.

6. The key values of the first and last fuzzy sets in the membership function of each independent variable determine the validity range of the fuzzy model. In other words, the model will be valid between the first and last key values of that variable(s). For this reason, it is always helpful to expand the limit ranges of the independent variables. In such a case, the error percentage will automatically decrease when the centroid method is used in the defuzzification process.

7. Key values such as K1, K2, and K3 are inputs of the fuzzy model.

8. After these processes and work, the dependent variable, in other words, the values of the output, will be determined in response to these selected values of each variable. Output values against these calculated values of the inputs are obtained either experimentally or by an experienced expert. A safe formula in the literature can be used for this purpose. The values obtained in this way will be the key values of the fuzzy sets of the output. The membership function of the output is found in this way. The membership function of the output will give the fuzzy rule base. Therefore, each key value of the output will yield a rule. Then, the number of fuzzy sets in the membership function of the output will be equal to the number of fuzzy rules, and no combination will be skipped.

9. In this way, after determining both membership functions and rules, the next step is the process. In this process, the fuzzy SMRGT model is optionally run in a package program. The most suitable package program for this job is MATLAB.

10. Input and output files prepared in this program are loaded into the program with a ".dat" extension. If necessary, 4 data files (input and output) can be prepared and loaded into the program for each test and calibration stage. The program is loaded into the program with a ".fis" extension. Then, a file with the ".m" extension is prepared to run the program. Model results are obtained by running this file with the ".m" extension.

11. Preparing the program with this method will save it from the trial and error process. The process volume will be low and short even if it does not. If the membership functions of the output are more intertwined than they usually are, two or more intertwined membership functions must be reduced to one [20-24].

As noted above for the Rational Method, each method has specific watershed, meteorological, or hydrological conditions. However, the fuzzy SMRGT Model does not need boundary conditions. The modeler can choose the minimum-maximum ranges of the model variables as desired. This range is also the range for which the model is valid and freely determined by the modeler. This makes the Fuzzy SMRGT Method easier and more reliable to use and is the reason why it is preferred over the existing methods reported in the literature.

Finding and Discussion

Determining Overflow Debits

The Rational Method, which is frequently used for this purpose, was used for flood calculation. Since the main independent variable is flow coefficient in all the related equations including Rational Method, realistically determining the flow coefficient is vitally important. In this study for determining flow coefficient SMRGT method was used. Results of SMRGT model, relatively, can be accepted as more precies, because the methodology has a physical cause and effect base. The average flow coefficient of the Kalecik basin is 0.28, and the flow coefficient map of the basin is given in Figure 2. However, it is also known that the area of use of this method is 0-5 km^2 [51]. The basin area is 5460 km^2. An objection can be made here at this point. To avoid such an objection, the area was not taken as a whole when the flood map was drawn, and equivalent overflow debit curves were drawn depending on the increase in the basin area (i.e. per unit area). For this reason, the area limitation that was foreseen in the Rational Method does not prevent the drawing of the contour map (equivalent overflow debit curves).

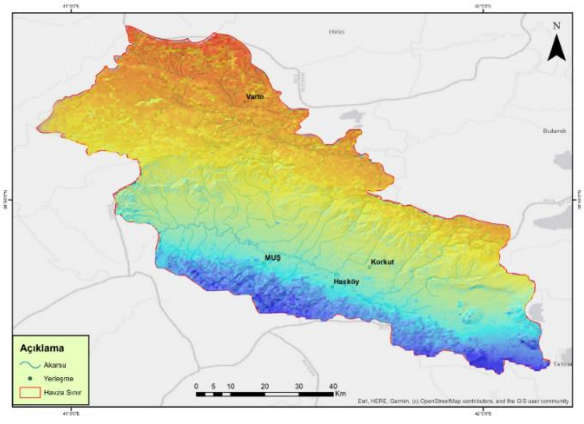


Figure 2. Map of the flow coefficient [35].

A contour map (in other words, a contour map of overflow debit curves) is a three-variable and two-dimensional graph. The variable X represents time in hours in a year, the variable Y represents the result of the overflow coefficient and the area *(C*A, m^2)*, and the Z variable represents the overflow debit (*Q, m^3/hour*). The equivalent

overflow map that was obtained by using the Surfer Program is given in Figure 3 However, this map shows only the variation of the overflow debit over time and the area multiplied by the average flow coefficient. The precipitation data obtained from the station in Korkut County in the center of the basin are in hourly kg/m^2/hour format and cover the years 2015 – 2020 (24 hours of 365 days were brought one after the other for each year and the average of 5 years was taken). For this reason, 8760 data were used in total. Then, the basin area was divided by 8760 and an equal number of area data was obtained. However, the area data are supplementary and valid for all basins that have an area between 0 - 5460 km^2. Here, the number of variables was 4 (area, precipitation intensity, flow coefficient, and flood flow rate), and the contour map was drawn with only three variables. For this reason, the number of variables was reduced to 3 by multiplying 2 of them (area and flow coefficients). The overflow debit was drawn depending on the X (time) and Y (C*A) variables, which were set as isocurves as the product of all three variables.

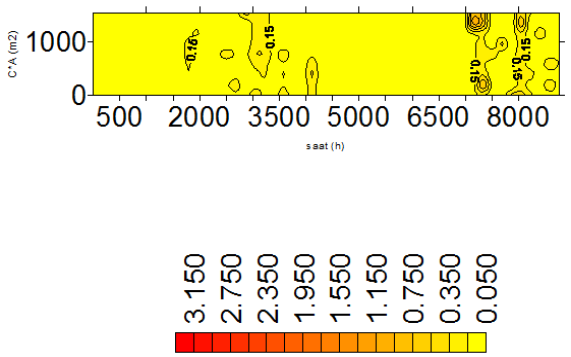


Figure 3. Equivalent flow rate curves (contour map)

It can easily be seen in Figure 3 that the values that corresponded to the spring and winter months were high and there was no overflow risk in the remaining dry seasons. Regarding the variables in the map, Figure 3 shows that the curves are more frequent, similar, and uniformly circular, and the color is darker for the values of C*A 1000 and above, h values between 7500-8000 and 8500. The visual in this part of the map means that the overflow debit values were higher and changed more and more smoothly depending on the variables, especially C*A in the given ranges of the variables. For the smaller values of C*A between 0-1000 and of h between 2000-5000, it is obvious that the curves are different, independent, flatter, sparse, and lighter in color. It can also be said that the overflow debit values change less and irregularly depending on the smaller variables in this part of the map.

Although the rainfall intensity data that are needed to create the map were obtained from the Korkut station that was closest to the Kalecik Basin, the map given in Figure 3 is not specific to Kalecik. In general, it provides the variation of the equivalent overflow debit depending on the two independent variables mentioned. To produce it specifically for Kalecik Basin, the overflow coefficient map given in Figure 2 must be taken as the basis and the overflow debit must be processed on it. The current situation was discussed in this study, and it is also considered to obtain a special map for the Kalecik basin as a separate prospective study. Also, the flood risk assessment of the settlements in the basin was made based on the flow coefficient map given in Figure 2. In this respect, the risk was divided into 5 groups insignificant (1), low-risk (2), medium-risk (3), risky (4), and very risky (5). There are 250 settlements in total in the area, including the center of Muş, its counties, and villages in the basin. The results of the evaluation of some of the settlements according to the overflow risk are given in Table 1 according to the risk levels. A certain number of settlements are given because the number of pages is high in the table.

Table 1: The results of the evaluation of some of the settlements according to the overflow risk

No	Insignificant (1)	Low-risk (2)	Moderate-risk (3)	Risky (4)	High-risk (5)
1	Demirci	Gedikpınar	Oduncular	Yazıkonak	Örenlik
2	Elçiler	Çıtak	Güroymak Merkez köy	Tahtalı	Kuştaşı
3	Üçsırt	Yolgözler	Güroymak	Arpacık	
4	Keçidere	Sarmaşık	Yamaçköy	Yukarı Kolbaşı	
5	Alagün	Yünören	Günkırı	Çallı	
6	Mescitli	İçboğaz	Büvetli	Kekliktepe	
7	Aligedik	Bahçe	Değirmenköy	Aşağı Kolbaşı	
8	Kumlukıyı	Değirmitaş	Sütderesi	Kavunlu	
9	Sanlıca	Durucak	Ortanca	Kaleli	
10	Değerli	Tanköy	Otaç	Saklı	
11	Kayalıdere	Çalaplı	Gökyazı	Küllüce	
12	Ulusırt	Balkır	Budaklı	Üzümveren	
13	Karapınar	Çınarardı	Koçköy	Kapaklı	
14	Kayalık	Güven	Gölbaşı	Koğuktaş	
15	Tepeköy	Taşlıca	Düzova	Böğürdelen	
16	Kuşluk	Karakale	Yukarı Üçdam	Karakütük	
17	Bağiçi	Yazla	Güzelli	Azıklı	
18	Aşağı Hacıbey	Kırköy	Sarıbahçe	Yarkaya	
19	Dönertaş	Boyuncuk	Umurca	Dağdibi	
20	Özenç	Aşağı Sızma	Özkavak	Derecik	

According to Table 1 given partially, the places that had the highest overflow risks were Örenlik and Kuştaşı

villages. Also, 26 settlements were found to be in the risky group, 84 settlements in the medium-risk group, 65 settlements in the low-risk group, and the remaining 73 settlements were in the insignificant group. When the chart is examined, it has been found, in general, that the multi-risk group was the least and the medium-risk group was the highest.

Conclusions

To take precautions, floods must be predicted in advance as accurately as possible. For the aim, in the present study, a fuzzy model has been developed to estimate the flow rate. To construct the membership functions and to generate the fuzzy rules of the model the SMRGT method, which novel in literature, have been used. On the other hand, the main advantage of SMRGT makes estimation with physical cause - effect relationship. As the results, the flow coefficient has been determined particularly for Kalecik Basin as an application of fuzzy SMRGT model. Furthermore, a flood risk map obtained for the same Basin. It can be concluded that the fuzzy SMRGT can be used for modeling and it gives more precious and realistic results compared with the conventional methods. The flood map of the basin was drawn and necessary explanations/legend were made on the map. It is considered that these maps will be beneficial for the local governments in the basin to revise the development plans of urbanization according to the results obtained in the scope of this study. Further, it is also hoped that the present study will bring a humble benefit to the mapping of the flood and overflow areas of different basins and regions in a great manner.

References

[1] O. Ozcan, “Evaluation of flood risk analysis in the Sakarya river subbasin by using remote sensing and GIS,” M.S. thesis, Technical Univ. of Istanbul, 2008.

[2] Z. Toprak, M. Savci, and C. Avci, “Comparison of the dispersion model results using the contour map method,” in *Proc. 6th Int. Congr. Advances in Civil Engineering (ACE2004)*, 2004, pp. 1407–1417.

[3] T. Cosgun, İ. B. Peker, B. Sayin, S. Gülbaz, and R. Durgut, “Assessment of flood event based on numerical models and legal statute: A case of Eşkinoz Stream in Istanbul, Turkey,” *Arab. J. Geosci.*, vol. 15, no. 7, p. 585, 2022.

[4] H. Akay and M. Baduna Koçyiğit, “Comparison of Direct Runoff Hydrographs of Two Ungauged Sub-Basins Using Instantaneous Unit Hydrograph Approach,” *J. Nat. Hazards Environ.*, vol. 5, no. 2, pp. 1–8, 2019.

[5] G. Berz, “Flood disasters: lessons from the past—worries for the future,” *Proc. Inst. Civ. Eng. Water Marit. Eng.*, vol. 142, no. 1, pp. 3–8, 2000.

[6] A. Ü. Kömüşçü, S. Çelik, and A. Ceylan, “Rainfall analysis of the flood event that occurred in Marmara Region on 8–12 September 2009,” *Turk. J. Geogr. Sci.*, vol. 9, no. 2, pp. 209–220, 2011.

[7] M. Sunkar and A. Toprak, “Importance of historical data sources in flood and overflow studies,” in *Proc. Int. Geogr. Symp.*, Ankara, Turkey, Oct. 2016.

[8] M. A. Trigg *et al.*, “The credibility challenge for global fluvial flood risk analysis,” *Environ. Res. Lett.*, vol. 11, no. 9, p. 094014, 2016.

[9] L. Wang *et al.*, “A review of the flood management: from flood control to flood resilience,” *Heliyon*, vol. 8, no. 11, 2022.

[10] EM-DAT, “The OFDA/CRED–International Disaster Database,” Univ. Catholique de Louvain, Brussels, Belgium, 2016.

[11] P. Yapo, S. Sorooshian, and V. Gupta, “A Markov chain flow model for flood forecasting,” *Water Resour. Res.*, vol. 29, no. 7, pp. 2427–2436, 1993.

[12] K. Stronska *et al.*, “Flood Management and Flood Forecasting Tool for the Odra River, Poland,” in *Proc. 3rd DHI Softw. Conf.*, Helsingør, Denmark, 1999.

[13] O. İrfan, K. Yürekli, and F. Öztürk, “Modeling Daily Flows in Tokat Uğrak Catchment,” *Int. J. Agric. Nat. Sci.*, vol. 3, no. 1, pp. 7–11, 2010.

[14] S. Barbero, D. Rabuffetti, G. Wilson, and M. Buffo, “Development of a Physically-Based Flood Forecasting System: ‘MIKE FloodWatch’ in the Piemonte Region, Italy,” in *Proc. 4th DHI Softw. Conf.*, Helsingør, Denmark, 2001.

[15] N. Seçkin, A. Güven, and A. Yurtal, “Modeling Flood Discharge Using Artificial Neural Network: Case Study—The Middle Black Sea Watershed,” *Cukurova Univ. J. Fac. Eng.*, vol. 25, no. 1, pp. 45–56, 2010.

[16] H. I. Burgan and Y. Icaga, “Flood analysis using adaptive hydraulics (AdH) model in Akarcay Basin,” *Teknik Dergi*, vol. 30, no. 2, pp. 9029–9051, 2019.

[17] T. Özkoca and A. Ü. Keskin, “Analysis of the Effect of Climate Change on Flood Flows of Kemer Ağva River, Antalya,” *J. Nature*, vol. 1, pp. 6576, 2022.

[18] O. L. Asikoglu, “Parent flood frequency distribution of Turkish Rivers,” *Pol. J. Environ. Stud.*, vol. 27, no. 2, pp. 529–539, 2018.

[19] S. Gülbaz, C. M. Kazezyilmazalhan, R. Nasirzadehdizaji, and M. Dikici, “A calibrated

hydrological model for Alibeyköy Watershed in Istanbul, Turkey incorporating LID implementation," *Fresenius Environ. Bull.*, vol. 26, no. 10, pp. 6112–6120, 2017.

[20] Z. F. Toprak, "Flow discharge modeling in open canals using a new fuzzy modeling technique (SMRGT)," *Clean Soil Air Water*, vol. 37, no. 9, pp. 742–752, 2009.

[21] R. Barati, "Analysis and evaluation of optimization algorithms application for parameter estimation of Muskingum flood routing models in rivers," Jun. 2014, pp. 1–8.

[22] S. Toprak, A. Atay, and Z. F. Toprak, "SMRGT yöntemi ile bulanıklaştırılmış veriler için bulanık doğrusal regresyon," *Erciyes Univ. J. Inst. Sci. Tech.*, vol. 31, no. 3, pp. 1–7, 2015.

[23] S. Yalaz and A. A. Atay, "Fuzzy linear regression for the time series data which is fuzzified with SMRGT Method," *Süleyman Demirel Univ. J. Inst. Sci. Tech.*, vol. 20, no. 3, pp. 405–413, 2016.

[24] Z. F. Toprak, A. Toprak, and Z. Aykaç, "Bulanık SMRGT yönteminin pratik uygulamaları," *Dicle Univ. J. Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 123–132, 2017.

[25] V. Arslan and S. Ulubeyli, "Bulanık veri zarflama analizi ile beton pompası seçimi," *Dicle Univ. J. Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–12, 2017.

[26] E. Altaş, M. C. Aydın, and Z. F. Toprak, "Açık kanal akımlarında su yüzü profilinin bulanık SMRGT yöntemiyle modellenmesi," *Dicle Univ. J. Eng.*, vol. 9, no. 2, pp. 975–981, 2018.

[27] R. Jain, N. Jain, S. Kapania, and L. H. Son, "Degree approximation-based fuzzy partitioning algorithm and applications in wheat production prediction," *Symmetry*, vol. 10, no. 12, p. 768, 2018.

[28] G. Bayri, "Zeminlerin Basit Üyeli Fonksiyonlar ve Bulanik Kurallar Üretim Tekniği (SMRGT) ile Sınıflandırılması," M.S. thesis, Bitlis Eren Univ., 2018.

[29] İ. Dabanlı, "Kuraklık riskinin bulanık mantık yardımıyla Türkiye genelinde değerlendirilmesi," *Dicle Univ. J. Eng.*, vol. 10, no. 1, pp. 359–372, 2019.

[30] F. Üneş *et al.*, "River flow estimation using artificial intelligence and fuzzy techniques," *Water*, vol. 12, no. 9, p. 2427, 2020.

[31] D. Topuz and N. Şahinler, "Arı sütü miktarının tahminine yönelik olarak elde edilen kategorik verilerin bulanık aralık regresyon modeli ile analizi," *Turk. J. Agric. Nat. Sci.*, vol. 7, no. 2, pp. 471–479, 2020.

[32] F. Şevgin and Z. F. Toprak, "Meteorolojik akış katsayısının bulanık SMRGT yöntemi ile belirlenmesi: Murat Havzası örneği," *Dicle Univ. J. Eng.*, vol. 12, no. 2, pp. 401–409, 2021.

[33] C. Sezen and T. Partal, "Utilization of stochastic, artificial neural network, and wavelet combined models for monthly streamflow," *Bilecik Şeyh Edebali Univ. J. Sci.*, vol. 8, no. 1, 2021.

[34] Z. Kınık and Z. Aykaç, "Atıksu arıtma tesislerinde karşılaşılan problemler ve çözüm önerileri," *Turk. Hydraul. J.*, vol. 5, no. 1, pp. 59–65, 2021.

[35] F. Şevgin, "Bulanık SMRGT yöntemi ile taşkın modellenmesi ve Kalecik havzası örneği," Ph.D. dissertation, Dicle Univ., Inst. Sci. Tech., Diyarbakır, 2021.

[36] E. E. Er, F. Üneş, and B. Taşar, "Estimating dam reservoir level change of Istanbul Alibey Dam with the fuzzy SMRGT method," *Osmaniye Korkut Ata Univ. J. Inst. Sci. Tech.*, vol. 5, Special Issue, pp. 80–95, 2022.

[37] A. Y. Gunal and R. Mehdi, "The study of land use and slope role in flow coefficient determination," in *Proc. Adv. Eng. Days (AED)*, vol. 4, pp. 64–66, 2022.

[38] Y. Zhou *et al.*, "Waste management within the scope of environmental public awareness based on cross-sectional survey and social interviews," *Front. Environ. Sci.*, vol. 10, p. 1030525, 2022.

[39] A. Y. Gunal and R. Mehdi, "Forecasting the flow coefficient of the river basin using adaptive fuzzy inference system and fuzzy SMRGT method," *J. Ecol. Eng.*, vol. 24, no. 7, 2023.

[40] S. Demirel, B. Taşar, Y. Z. Kaya, F. Üneş, and M. Demirci, "Adana ili referans evapotranspirasyon miktarının bulanık SMRGT, ANFIS ve çoklu doğrusal regresyon kullanılarak tahmini," *Osmaniye Korkut Ata Univ. J. Inst. Sci. Tech.*, vol. 6, no. 1, pp. 106–120, 2023.

[41] R. Mehdi and A. Y. Gunal, "Computation of flow coefficient via non-deterministic approach of fuzzy logic called 'SMRGT' based on meteorological properties," *Jordan J. Civil Eng.*, vol. 17, no. 4, 2023.

[42] A. Y. Gunal and R. Mehdi, "Flow coefficient determination in catchment based on analysis of temperature and wind speed data using the fuzzy SMRGT method," in *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 1222, no. 1, p. 012014, Aug. 2023.

[43] M. Ruya and A. Y. Gunal, "A comparative study of using adaptive neural fuzzy inference system (ANFIS), Gaussian process regression (GPR), and SMRGT models in flow coefficient estimation," *3C Tecnol.*, vol. 12, no. 2, pp. 125–146, 2023.

[44] H. Kocabaş, F. Üneş, B. Taşar, and Ö. F. Cansız, "Türkiye karayollarındaki karbondioksit emisyonunun yapay zekâ yöntemleri ile tahmini," *Turk. J. Technol. Appl. Sci.*, vol. 4, no. 2, pp. 82–101, 2023.

[45] R. Zainalabdeen, "Flow coefficient modeling using the fuzzy SMRGT method compared with ANFIS and ANN methods: An example of the Aksu River Basin," Ph.D. dissertation, Gaziantep Univ., Grad. Sch. Nat. Appl. Sci., Gaziantep, 2023.

[46] A. Y. GÜNAL and R. Mehdi, "Application of a new fuzzy logic model known as 'SMRGT' for estimating flow coefficient rate," *Turk. J. Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 46–55, 2024.

[47] E. Karabacak and H. A. Kutlu, "Evaluating the efficiencies of logistics centers with fuzzy logic: The case of Turkey," *Sustainability*, vol. 16, no. 1, p. 438, 2024.

[48] A. Ç. Aydın, "İşitsel peyzajda ses çevresi memnuniyet düzeyinin bulanık mantık ile tahmin edilmesi: Diyarbakır Suriçi uygulaması," Ph.D. dissertation, İstanbul Tech. Univ., Inst. Sci. Tech., Mar. 2017.

[49] D. Karakaya, "Akış katsayısının bulanık SMRGT yöntemi ile modellenmesi," M.S. thesis, Dicle Univ., Inst. Sci., National Thesis No: 540658, Dec. 10, 2018.

[50] H. Oshikawa and T. Komatsu, "Flood control mechanism of multiple dams constructed in a series based on cascade method," *J. Disaster Res.*, vol. 10, no. 3, pp. 475–485, 2015.

[51] J. Warner, "The struggle over Turkey's Ilısu Dam: Domestic and international security linkages," *Int. Environ. Agreements*, vol. 12, pp. 231–250, 2012.

[52] V. Te, D. R. Maidment, and L. W. Mays, "Applied hydrology," *J. Eng. Educ.*, 1962.

[53] R. K. Linsley, M. A. Kohler, and L. H. Paulhus, *Hydrology for Engineers*, 1975.

[54] P. Novak, A. I. B. Moffat, C. Nalluri, and R. A. Narayanan, *Hydraulic Structures*, CRC Press, 2017.

[55] H. Apaydin, M. T. Sattari, K. Falsafian, and R. Prasad, "Artificial intelligence modelling integrated with singular spectral analysis and seasonal-trend decomposition using Loess approaches for streamflow predictions," *J. Hydrol.*, vol. 600, p. 126506, 2021.

[56] S. Gülbaz, C. M. Kazezyılmaz-Alhan, A. Bahçeçi, and U. Boyraz, "Flood modeling of Ayamama River watershed in Istanbul, Turkey," *J. Hydrol. Eng.*, vol. 24, no. 1, p. 05018026, 2019.

Dicle University
Journal of Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/dumf
duje.dicle.edu.tr

Research Article

Influence of waste textile on the unconfined compressive strength of cohesive soil

Mitat ÖZTÜRK[1*]

[1] Osmaniye Korkut Ata University, Civil Engineering Department, mitatozturk@osmaniye.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-4685-7088

ARTICLE INFO

Article history:

Received 23 December 2024
Received in revised form 24 March 2025
Accepted 27 March 2025
Available online 30 June 2025

Keywords:

UCS, Soil improvement, stress-strain behavior, waste denim fabric

DOI: 10.24012/dumf.1605801

* Corresponding author

ABSTRACT

The increasing need for sustainable and environmentally friendly solutions in geotechnical engineering has prompted significant interest in utilizing waste materials for soil improvement. This study explores the utilize of waste denim fabric as a reinforcement material for clayey silt soil, aiming to enhance soil properties while contributing to the recycling of textile waste. Waste denim was prepared in three aspect ratios (A1: 6×6 mm, A2: 6×12 mm, and A4: 6×24 mm) and incorporated to the soil in different ratios based on dry weight (0.4%, 0.8%, and 1.6%). Unconfined compressive strength (UCS) tests were conducted to analyze the effects of denim reinforcement on stress-strain behavior, UCS value, elastic modulus, UCS increase ratio, deformability index, and normalized energy absorption capacity. The results demonstrated a significant enhancement in the mechanical properties of the reinforced soil compared to the unreinforced soil. The UCS increased notably with denim reinforcement, with the highest strength achieved by A4-sized fabric at 1.6% and 0.4% reinforcement rates, yielding approximately 41.67% and 40.91% increases, respectively. Furthermore, the energy absorption index showed the most substantial improvement with A4-sized fabric, reaching a normalized value of 1.4, highlighting its superior ability to dissipate energy under loading. Additionally, the elastic modulus, representing soil stiffness, increased with denim reinforcement, particularly with 0.4% A4 fabric, which achieved the highest value among all configurations. The study concludes that waste denim fabric is a viable, sustainable material for soil improvement, offering an eco-friendly alternative to traditional soil stabilization methods.

Introduction

Environmental pollution has become a critical problem threatening natural ecosystems due to the rapid increase in industrialization and urbanization. Increasing global population, changing consumption patterns and intensifying industrial activities have significantly increased the volume of environmental waste. In particular, the accumulation of non-biodegradable materials such as plastics, heavy metals, and various synthetic wastes in nature has negatively affected the quality of water resources, soil and air [1], [2], [3], [4]. Waste management is recognized as one of the most effective strategies to address these challenges. Practices such as recycling, reuse and waste minimization play a vital role in reducing the negative impact of waste on the environment. However, certain types of waste are often overlooked or poorly managed in these processes, limiting their overall effectiveness. The textile industry in particular is a major contributor to environmental pollution and waste denim fabrics pose a significant challenge in this context [5]. Therefore, recycling or disposing of waste denim through environmentally sound methods is a crucial step to reduce pollution and promote sustainable practices.

Waste management requires the contribution of many engineering disciplines to reduce environmental pollution and use resources more efficiently, and geotechnical engineering plays an important role in this process. Soil improvement techniques enable the reuse of waste, reducing the amount of waste and providing economic benefits. The use of geotechnical engineering in waste management has become a critical component for a sustainable environment. With geotechnical engineering applications, many waste materials are both disposed of by removing them from nature and improve soil behavior [6], [7]. In geotechnical engineering, waste materials such as construction demolition waste [8], fly ash [9], biopolymers [10], plastic waste [11], geopolymers [12], PVC fibers [13], and various solid wastes [14] used for soil stabilization and improvement.

Unconfined Compressive Strength (UCS) tests are a primary method for assessing the mechanical behavior of cohesive soils [15], [16], [17]. These tests provide the opportunity to analyze soil stability, strength and deformation behavior by determining the UCS of the soil. It plays an important role in determining soil bearing capacity and evaluating the effectiveness of different stabilization methods, especially in construction projects. UCS tests are also widely used to compare the performance of soils improved with waste additives and to model soil

behavior [18], [19], [20]. Therefore, UCS test results are a critical source of data for geotechnical design decisions.

In a recent study conducted by Öztürk (2024) [6], the use of waste modified expanded polystyrene (WMEPS) as a material for enhancing soil properties was investigated to address the dual challenges of environmental sustainability and geotechnical performance enhancement. The research aimed to demonstrate three main benefits: recycling waste EPS from the environment, developing lightweight backfill materials and improving the compressive properties of soils. To achieve this, waste EPS was subjected to thermal modification and then mixed into the clayey soil at different ratios (0.5% to 6% by dry weight). UCS tests were conducted on the prepared specimens cured for 1 and 28 days. The findings revealed that the incorporation of 5% WMEPS reduced the dry density of the soil by 15%, while increasing the UCS by 45.22% for specimens cured for 28 days. Notably, even small amounts of WMEPS1 significantly improved soil behavior, with a 28.9% UCS increase observed for 1 day cured samples containing 0.5% WMEPS1. However, excessive incorporation above 6% resulted in reduced strength gains. In a study by Yadav et al. (2022) [21], the strength and ductility behavior of rubber-granule and rubber-fiber reinforced cementitious clayey soils were investigated. The research included UCS tests to assess the effects of rubber content and cement proportions. The results demonstrated that the inclusion of rubber particles increased the ductility and toughness of cemented clay soil. In particular, the study reported an improvement in UCS of 5.08% and 3.46% with the addition of rubber granules and fibers at optimum content levels (2.5% and 5%, respectively). However, excessive rubber content led to strength reductions and rubber granules had a more pronounced effect than fibers. In particular, the toughness index and absolute toughness were maximized at 5% granules and 7.5% fibers. Choobbasti et al. (2019) [22] investigated the effects of carpet waste fibers and nano calcium carbonate on the geotechnical properties of clayey soils. The study used a comprehensive set of tests, including UCS tests, to evaluate the mechanical behavior of soil treated with these additives. The study revealed that specimens with 1.2% nano calcium carbonate content cured for 42 days had an optimum strength increase of approximately 100%. Bekhiti et al. (2019) [23] investigated the effects of waste tire rubber fibers on the UCS, ductility and swelling characteristics of cement-stabilized bentonite clay. The experimental program included varying the cement content (5%, 7.5% and 10%) and rubber fiber content (0%, 0.5%, 1% and 2%) by weight to evaluate their effects on soil behavior. The findings indicated that the inclusion of waste tire rubber fibers decreased the dry density, swelling potential and swelling pressure of the soil while increasing the optimum water content, which was attributed to the lightweight nature of the fibers and the water absorption capacity of the cement. Strength and ductility were significantly improved by UCS testing; the highest UCS and ductility index were noted at 2% rubber fiber content.

The compaction and recompaction indices increased proportionally with higher fiber and cement content, highlighting the beneficial role of fibers in improving soil deformability. Xu (2019) [24] highlights the relationship between UCS, curing age and other mechanical properties in his study on municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash. The findings reveal that initial elastic modulus and UCS of MSWI bottom ash increase logarithmically with curing age, indicating increasing material stability over time. The UCS values of saturated specimens increased from 326 to 926 kPa, while unsaturated specimens ranged from 305 to 810 kPa after 28 days of curing. Similarly, the elastic modulus increased significantly, underlining the increased stiffness of the material with curing. In addition, the study showed strong correlations between UCS, elastic modulus and ultrasonic wave velocity, demonstrating the applicability of non-destructive testing to predict mechanical behavior.

Despite the growing interest in the use of waste materials for soil stabilization, the use of waste denim textiles as a reinforcement for cohesive soils has not been extensively investigated in the existing literature. Although previous studies have investigated the effects of various waste materials on soil properties, the specific effect of waste denim textiles on the UCS of cohesive soils has not been explored. This gap provides an opportunity to evaluate the potential of waste denim as an innovative and sustainable reinforcement material addressing both geotechnical and environmental challenges.

In this study, waste denim fabrics were used as a sustainable material to enhance the geotechnical properties of cohesive soils. The waste denim fabrics were processed without any chemical treatment and Added to the soil in different proportions (0.4%, 0.8%, and 1.6% by dry weight of soil). The waste fabrics were approximately cut into three different sizes: 6× 6 mm, 6 × 12 mm and 6 × 24 mm, corresponding to aspect ratios of 1, 2 and 4, respectively. A series of UCS experiments were conducted on the prepared samples after a 7-day curing period. The effects of waste denim fabric inclusion on UCS value, deformability index, elastic modulus, normalized energy absorption index, and UCS increase ratio were evaluated. The findings highlight the feasibility of using waste denim fabrics as a reinforcement material for improvement of soil properties and offer an environmentally friendly alternative to conventional soil remediation methods.

Material and Method

In this study, clayey silt soil was used. According to ASTM D2487 and AASHTO M145 standards, the soil was classified as ML and A-7-5, respectively. The grain distribution curve and soil properties are given in Figure 1 and Table 1, respectively. The standards of index tests used to determine the properties of the soil are given in Table 1.

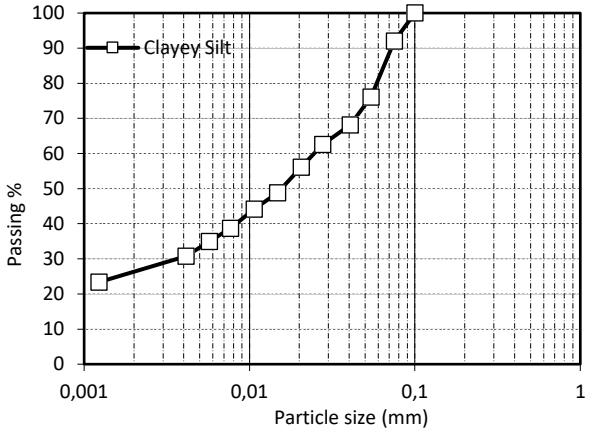


Figure 1. Particle size distribution of clayey silt

Table 1. Properties of clayey silt

Properties	Used Standards	Values
Specific gravity	ASTM D854 [25]	2.73
Optimum water content (%)	ASTM D698 [26]	23.54
Maximum dry density (g/cm3)	ASTM D698 [26]	1.71
Liquid limit (LL) %	ASTM D4318 [27]	41.60
Plastic limit (PL) %	ASTM D4318 [27]	26.80
Plasticity index (PI) %	ASTM D4318 [27]	14.80
Clay (%)	ASTM D7928 [28]	25
Silt (%)	ASTM D7928 [28]	67
Sand (%)	ASTM D2487 [29]	8
AASHTO Soil classification	AASHTO M145 [30]	A-7-5
Unified Soil classification	ASTM D2487 [29]	ML

In this study, waste denim fabric collected from a tailor shop was used as reinforcement material. The thickness of the waste denim fabric was determined to be 0.7 mm. The fabric was approximately cut into three different sizes: 6 mm × 6 mm, 6 mm × 12 mm and 6 mm × 24 mm, corresponding to aspect ratios of 1, 2 and 4, respectively. These cut pieces of waste denim were added to the soil at different dry weight ratios of 0.4%, 0.8% and 1.6%. A photo of 3 different aspect ratios of waste denim fabrics is illustrated in Figure 2.

(a) (b) (c)

Figure 2. Waste denim fabrics a) 6 mm × 6 mm b) 6 mm × 12 mm c) 6 mm × 24 mm

The experiments were conducted at a soil water content of 30%, which exceeds the optimum value. The selection of 30% water content is based on the understanding that the strength of cohesive soils is greatly influenced by their moisture content. Cohesive soil strength enhances with increasing moisture content up to a specific threshold, beyond which additional water content leads to a decrease in strength [31]. While embankments are typically compacted with soil at optimum moisture content, precipitation exposure can increase the moisture content of the soil, potentially reducing its strength and compromising structural integrity [32]. The study of soil behavior under high water content is critical for geotechnical engineering.

After mixing, both waste fabric reinforced and unreinforced soil specimens were compacted manually into molds in 3 layers and cured for seven days under airtight conditions to ensure uniform curing. As each layer was compacted, the surface of the previous compacted layer was roughened to ensure adherence with the next layer. Unconfined compressive strength (UCS) tests were performed on these specimens in accordance with ASTM D2166. The tests were performed up to 20% strain to fully capture stress-strain behavior. If the highest stress occurred before 20% strain, it was recorded as the maximum stress. Otherwise, the stress value at 20% strain was considered as the maximum stress. This methodology was performed to provide a comprehensive understanding of the mechanical behavior of the reinforced soil under tension.

The test conditions and procedures were used to evaluate the effect of both aspect ratio and content of denim reinforcement on the UCS and deformability properties of the cohesive soil and to highlight the potential of waste denim as a sustainable soil improvement material. The experimental results were assessed in terms of UCS increase ratio, UCS value, deformability index, , elastic modulus and energy absorption index.

Results and Discussion

The curves are not presented in the same graph for better comparison since presenting the curves in a single graph creates confusion. The aspect ratio and soil participation rate of the waste additive material are used as abbreviations in the graphs. A1 (6x6 mm), A2 (6x12 mm) and A4 (6x24 mm) represent the aspect ratio and 0.4%, 0.8% and 1.6% represent the incorporation rate: for example, A1-0.8% means that the material with an aspect ratio of 1 is incorporated into the soil at a rate of 0.8%. The UR

abbreviation in the graphs represents unreinforced soil. The results for soils containing different proportions of admixtures at the same aspect ratio are given in Figure 3, Figure 4 and Figure 5, respectively.

The figures show in detail the stress-strain behavior of soils reinforced with different proportions of waste denim fabric. The unreinforced soil has the lowest stress capacity and exhibits poor performance due to the increase in deformation. This shows that without reinforcement, the load bearing capacity of the soil is limited and stability problems become more pronounced. The curves of the reinforced soils show a stronger slope, indicating that these soils can withstand higher stresses and have a higher load carrying capacity. A significant enhancement in the mechanical performance of the soils was observed with increasing reinforcement rates (0.4%, 0.8% and 1.6%). In particular, the soil reinforced with 1.6% and 0.4% denim fabric reached the highest stress value, providing maximum stability and significantly increasing the resistance of the soil to deformation. The soils with 0.4% addition of waste additive exhibited almost similar behavior to the soils with 1.6% addition of waste additive. In particular, the soil reinforced with 1.6% denim fabric achieved maximum stability by reaching the highest stress value and significantly increased the resistance of the soil to deformation. In addition, the 0.4% and 0.8% reinforced soils also exhibited a much higher load bearing capacity compared to the unreinforced soil. The soils with 0.4% waste additives exhibited almost similar behavior to the soils with 1.6% waste additives. However, when the stress-strain curves were analyzed, it was observed that for all aspect ratios, the increase in additive content did not linearly increase strength. The addition of 0.8% of additive showed less performance improvement compared to 0.4% of additive content. If a comparison is made in terms of stress-strain performances for all aspect ratios, the order from best to worst is 1.6%, 0.4%, 0.8% and UR. Accordingly, the reinforcement of the soil with 0.4% can be chosen as the optimum value since it performs better than the reinforcement with 0.8% and similar to 1.6%.

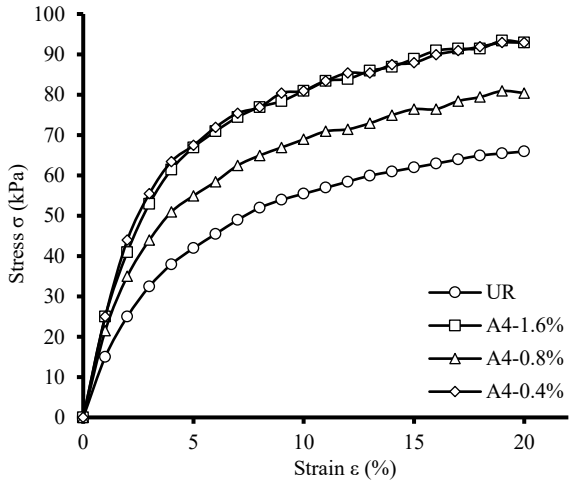


Figure 3. Stress-strain curves in aspect ratio 4

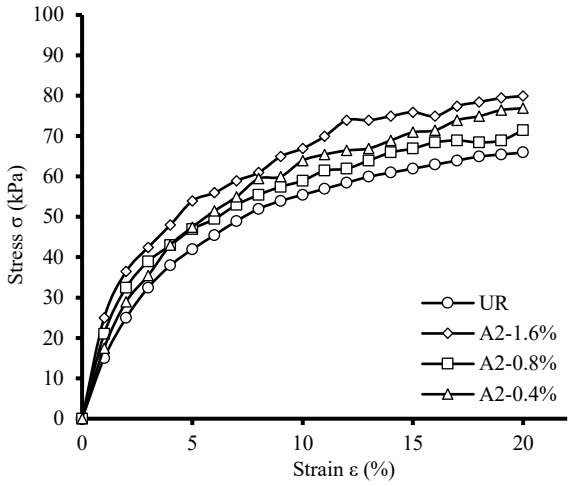


Figure 4. Stress-strain curves in aspect ratio 2

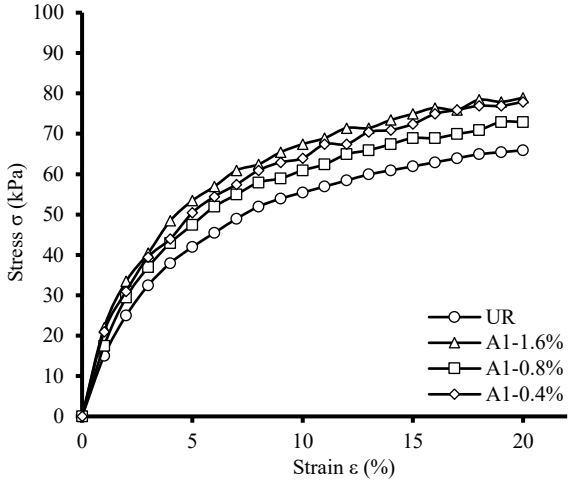


Figure 5. Stress-strain curves in aspect ratio 1

The results of the effects on the stress-strain behavior of soils with different aspect ratios (A1, A2 and A4) at the same admixture rate are given in Figure 6, Figure 7 and Figure 8, respectively. The unreinforced soil has the lowest bearing capacity and rapidly loses performance with increasing deformation. This indicates that the load carrying capacity of the soil is limited and the stability is inadequate without the addition of the waste leveling admixture. The mechanical properties of the soil have improved significantly with the addition of the waste soil admixture, but the extent of this improvement varies according to the size of the waste fabric used. In particular, the soil reinforced with A4 sized waste denim fabric achieved the maximum stability by reaching the highest stress values among all samples. A4 sized waste denim fabrics showed a steeper slope along the stress-strain curve and best improved the soil's resistance to deformation. A2 and A1 waste denim fabrics outperformed the unreinforced soil and provided a similar improvement; however, were lower than the contribution of A4 in terms of deformation resistance and load carrying capacity. This indicates that the larger size denim pieces created a stronger mechanical bond with the soil and increased its load bearing capacity. There was

no direct relationship between the aspect ratio of the waste denim fabric and the stress-strain behavior.

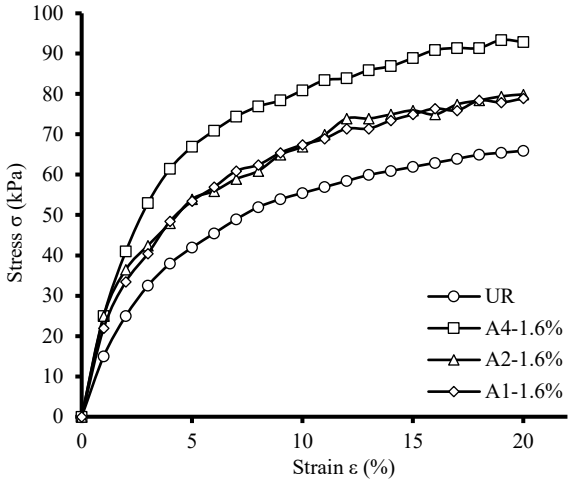


Figure 6. Stress-strain curves at 1.6% participation rate

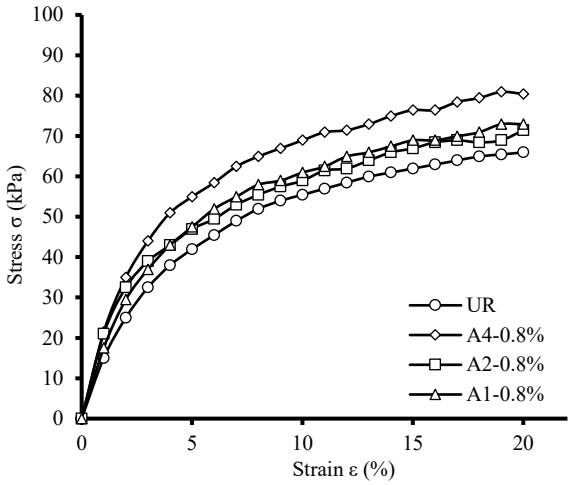


Figure 7. Stress-strain curves at 0.8% participation rate

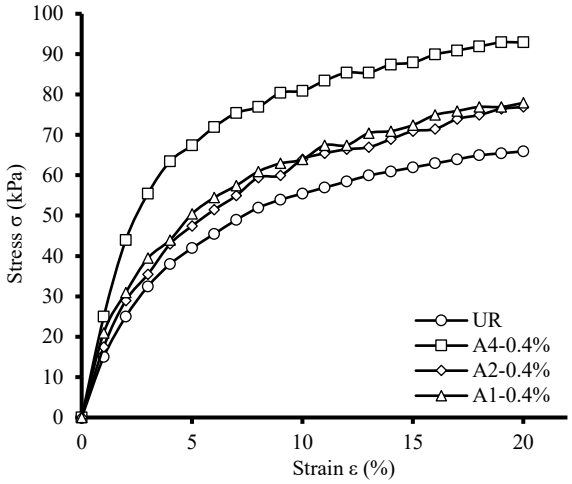


Figure 8. Stress-strain curves at 0.4% participation rate

Figure 9 and Figure 10 demonstrate the effect of different proportions and sizes of waste denim additives on the uniaxial compressive strength (UCS) and UCS increase ratio of the soil. The unreinforced soil had the lowest UCS value and showed a strength of approximately 70 kPa. A significant increase in UCS values was observed with the addition of waste denim fabric admixtures, but this increase varied depending on the size of denim used and the admixture rate. The highest UCS value was achieved by soil reinforced with 1.6% and 0.4% of A4 sized denim fabric, with strengths of 93.4 kPa and 92.9 kPa, respectively. However, the smaller size denim pieces (A2 and A1) reached a lower UCS value compared to the A4 size. For all aspect ratios, the UCS value of 0.4% and 1.6% waste admixture soil is similar and higher than the UCS value of the 0.8% waste admixture soil. Similar interpretations are valid for the UCS increase ratio graph given in Figure 10. Figure 10 indicated that the best strength increase is 41.67% and 40.91% for A4-1.6% and A4-0.4% respectively.

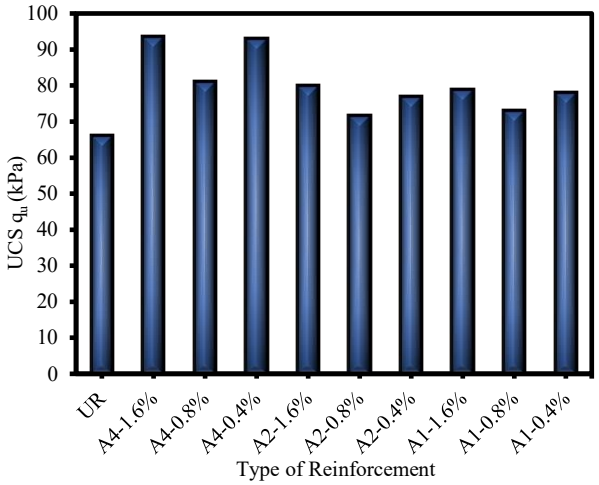


Figure 9. UCS value vs waste denim sizes and contents

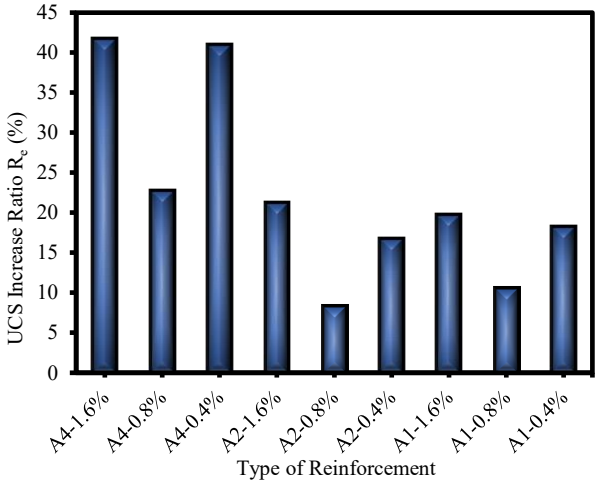


Figure 10. UCS increase ratio vs waste denim sizes and contents

Figure 11, Figure 12 and Figure 13 present the comparison of elastic modulus, deformability index and normalized energy absorption index values of unreinforced soil and soils with different sizes and proportions of waste denim fabrics, respectively. The elastic modulus of the soil is a measure of the material's stiffness. It was determined by calculating the slope of the initial portion of the stress-strain curve corresponding to the elastic deformation phase. A general increase in the elastic modulus values is observed with the addition of the waste denim. In particular, the soil reinforced with 0.4% of A4 size of waste cement reached the highest elastic modulus value. According to Veena and James (2022) [33], the deformability index was calculated by taking the ratio of the strain at peak stress in the reinforced test to the strain at peak shear stress in the unreinforced experiment. Since the soil has a water content exceeding the optimum water content, the stress-strain curves do not show abrupt decreases in stress. As a result, the strain values at the point of maximum stress are quite comparable, leading to deformability index values that lack sufficient distinctiveness for meaningful interpretation. The energy absorption capacity is associated with the area of the stress-strain curve prior to failure. This means that the larger the area under the curve, the greater the material's ability to absorb energy before breaking. In this study, following the approach of Yadav et al. (2019) [21], the area under the curve up to the peak stress was used to calculate the energy absorption capacity. This method ensures a consistent and reliable way to compare the energy absorption performance of different soil mixtures. Subsequently, the energy absorption values for the reinforced mixtures were standardized by dividing them of the unreinforced soil. The normalized energy absorption index values greater than 1 indicate that the waste denim admixture is effective in rising the energy absorption capacity during load bearing. A value above 1 suggests that the addition of waste denim fibers enhances the soil's ability to resist deformation under stress. In particular, the A4 size leveling admixture performed the best, reaching an energy absorption index of about 1.4 when used at 1.6% and 0.4%. This finding highlights the potential of optimized denim fiber reinforcement in improving the mechanical performance of soil, especially in applications requiring enhanced energy absorption.

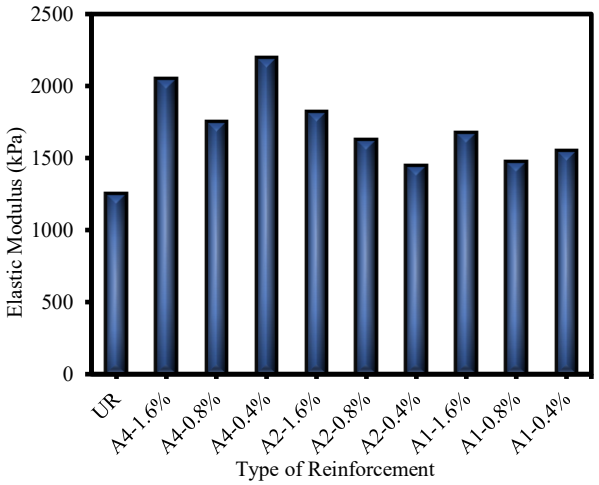


Figure 11. Elastic modulus vs waste denim sizes and contents

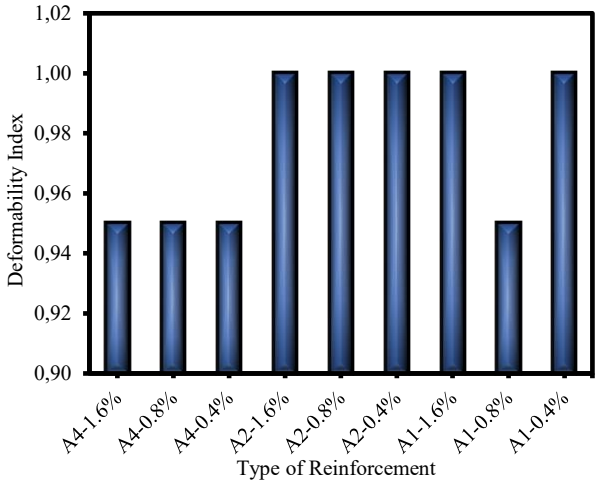


Figure 12. Deformability index vs waste denim sizes and contents

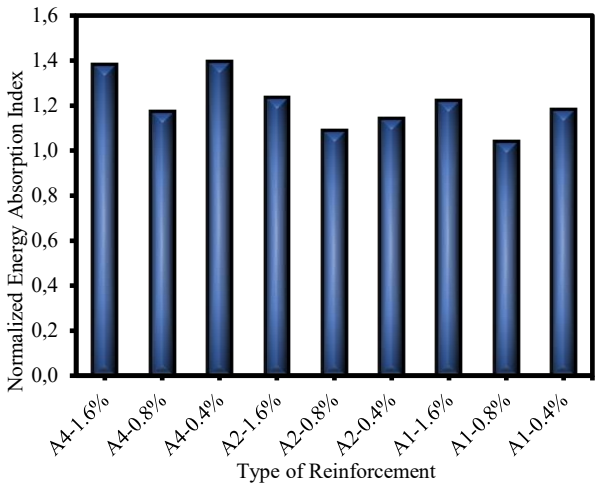


Figure 13. Normalized energy absorption index vs waste denim sizes and contents

Conclusions

This study aimed to evaluate the potential of waste denim fabric as a sustainable soil improvement material, focusing on its impact on mechanical properties such as unconfined compressive strength (UCS), UCS increase ratio, elastic modulus, deformability index, and energy absorption capacity. Waste denim fabric was prepared in three aspect ratios (A1, A2, and A4) and incorporated into clayey silt soil at varying proportions (0.4%, 0.8%, and 1.6%) by dry weight of the soil. The reinforced and unreinforced soil specimens were cured for seven days, and their stress-strain behaviors were experimentally investigated. The following conclusions were drawn:

- The addition of waste denim fabric significantly improved the mechanical performance of the soil, with reinforced specimens outperforming unreinforced ones in terms of UCS, elastic modulus, and energy absorption index.
- Soils reinforced with A4-sized denim fabric showed the highest UCS, elastic modulus and energy absorption capacity, indicating that larger denim pieces create stronger mechanical bonds with the soil, enhancing its load-bearing capacity and deformation resistance
- Among all proportions, 0.4% and 1.6% reinforcement provided the best results, with similar UCS and energy absorption values. This suggests that 0.4% can be considered an optimum reinforcement ratio as it yields comparable performance to 1.6% while requiring less material.
- The elastic modulus of the soil increased with denim reinforcement, with the highest value observed for 0.4% of A4-sized fabric.
- Reinforcement of clayey silt soil with waste denim fabric presents an eco-friendly approach to waste management while improving soil behavior. It also demonstrates the feasibility of utilizing waste fabrics in geotechnical engineering, contributing to sustainable construction practices.

Ethics committee approval and conflict of interest statement

There is no need to obtain permission from the ethics committee for the article prepared

There is no conflict of interest with any person / institution in the article prepared

Acknowledgment

This research did not receive any specific grant.

References

[1] F. Cássio, D. Batista, and A. Pradhan, “Plastic Interactions with Pollutants and Consequences to Aquatic Ecosystems: What We Know and What We Do Not Know,” *Biomolecules*, vol. 12, no. 6, p. 798, Jun. 2022, doi: 10.3390/biom12060798.

[2] P. Pant, D. Chauhan, M. Chauhan, A. Kumar, and A. Kaushik, “Plastic and Microplastic Wastes as Environmental Toxicants,” in *Bioremediation of Environmental Toxicants*, Boca Raton: CRC Press, 2024, pp. 41–56. doi: 10.1201/9781003310136-4.

[3] S. V. Mohanaprasadh, P. Singh, and K. D. Bahukhandi, “Disposal of Non-biodegradable Waste Using Eco-Friendly Methods,” in *In Environmental Pollution and Natural Resource Management*, 2022, pp. 345–363. doi: 10.1007/978-3-031-05335-1_20.

[4] P. Jain, “Effect of Biodegradation and Non Degradable Substances in Environment,” *International Journal of Life Sciences*, pp. 50–55, Mar. 2017, doi: 10.21744/ijls.v1i1.24.

[5] R. Rathinamoorthy and T. Karthik, “Chemicals and effluent treatment in denim processing,” in *Sustainability in Denim*, Elsevier, 2017, pp. 197–234. doi: 10.1016/B978-0-08-102043-2.00008-3.

[6] M. Öztürk, “Strength characteristics of lightweight soil with waste modified expanded polystyrene particles,” *Constr Build Mater*, vol. 442, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137635.

[7] M. G. Ujankar and P. Hari Krishna, “Use of Waste Polypropylene Plastic in Geotechnical Applications,” 2020, pp. 291–299. doi: 10.1007/978-981-15-3662-5_24.

[8] B. Bagriacik, “Utilization of alkali-activated construction demolition waste for sandy soil improvement with large-scale laboratory experiments,” *Constr Build Mater*, vol. 302, p. 124173, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124173.

[9] S. Akbulut and A. Saglamer, “Modification of hydraulic conductivity in granular soils using waste materials,” *Waste Management*, vol. 24, no. 5, pp. 491–499, Jan. 2004, doi: 10.1016/j.wasman.2004.01.002.

[10] N. Dora, P. Nanda, and N. G. Reddy, “Application of Biopolymers for Enhancing Engineering Properties of Problematic Soils and Industrial Wastes: A Review,” 2021, pp. 203–211. doi: 10.1007/978-981-33-4590-4_20.

[11] N.-M. Ilieş, A.-P. Cîrcu, A.-C. Nagy, V.-C. Ciubotaru, and Z. Kisfaludi-Bak, “Comparative Study on Soil Stabilization with Polyethylene Waste Materials and Binders,” *Procedia Eng*, vol. 181, pp. 444–451, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.02.414.

[12] M. Yaghoubi, A. Arulrajah, and S. Horpibulsuk, “Engineering Behaviour of a Geopolymer-stabilised High-water Content Soft Clay,” *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, vol. 8, no. 3, p. 45, Jun. 2022, doi: 10.1007/s40891-022-00385-z.

[13] N. URAL, Ü. KUT, and N. GÜLSEVİNÇ, “Atık PVC ile Zemin İyileştirme,” *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, Aug. 2020, doi: 10.31202/ecjse.747919.

[14] C.-H. Liu and C. Hung, “Reutilization of solid wastes to improve the hydromechanical and mechanical behaviors of soils — a state-of-the-art review,” *Sustainable Environment Research*, vol. 33, no. 1, p. 17, May 2023, doi: 10.1186/s42834-023-00179-6.

[15] N. Kardani, A. Zhou, S.-L. Shen, and M. Nazem, "Estimating unconfined compressive strength of unsaturated cemented soils using alternative evolutionary approaches," *Transportation Geotechnics*, vol. 29, p. 100591, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.trgeo.2021.100591.

[16] P. Nagendra, M. Samarth Urs, K. N. Prakash Narasimha, C. Vinay, and M. Savitha, "Estimation of Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soils in and Around Mysore, South India," 2024, pp. 167–180. doi: 10.1007/978-981-99-8505-0_17.

[17] I. T. Bahmed, J. Khatti, and K. S. Grover, "Hybrid soft computing models for predicting unconfined compressive strength of lime stabilized soil using strength property of virgin cohesive soil," *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 83, no. 1, p. 46, Jan. 2024, doi: 10.1007/s10064-023-03537-1.

[18] G. U. Alaneme *et al.*, "Mechanical Properties Optimization and Simulation of Soil–Saw Dust Ash Blend Using Extreme Vertex Design (EVD) Method," *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 17, no. 4, pp. 827–853, Jul. 2024, doi: 10.1007/s42947-023-00272-4.

[19] S. Z. Ashiq, A. Akbar, K. Farooq, and H. Mujtaba, "Sustainable improvement in engineering behavior of Siwalik Clay using industrial waste glass powder as additive," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 16, p. e00883, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e00883.

[20] M. A. M. Al-Bared, Z. Mustaffa, D. J. Armaghani, A. Marto, N. Z. M. Yunus, and M. Hasanipanah, "Application of hybrid intelligent systems in predicting the unconfined compressive strength of clay material mixed with recycled additive," *Transportation Geotechnics*, vol. 30, p. 100627, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.trgeo.2021.100627.

[21] J. S. Yadav, S. K. Tiwari, and A. Garg, "Strength and ductility behaviour of rubberised cemented clayey soil," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, vol. 175, no. 1, pp. 34–50, Feb. 2022, doi: 10.1680/jgrim.19.00017.

[22] A. J. Choobbasti, M. A. Samakoosh, and S. S. Kutanaei, "Mechanical properties soil stabilized with nano calcium carbonate and reinforced with carpet waste fibers," *Constr Build Mater*, vol. 211, pp. 1094–1104, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.306.

[23] M. Bekhiti, H. Trouzine, and M. Rabehi, "Influence of waste tire rubber fibers on swelling behavior, unconfined compressive strength and ductility of cement stabilized bentonite clay soil," *Constr Build Mater*, vol. 208, pp. 304–313, May 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.011.

[24] Y. Xu, "Unconfined Compressive Strength of Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ashes," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 37, no. 3, pp. 1373–1382, Jun. 2019, doi: 10.1007/s10706-018-0692-7.

[25] ASTM D854, "Standard Test Methods for Manganese in Water," *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2007.

[26] ASTM D698, "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort," *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2007.

[27] ASTM D4318, "Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils," *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2018.

[28] ASTM D7928, "Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis," *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2021.

[29] ASTM D2487, "Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)," *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2006.

[30] AASHTO M145, "Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes," *Am. Assoc. State Highw. Transp. Off, Philadelphia, PA.*, 1991.

[31] J. P. Malizia and A. Shakoor, "Effect of water content and density on strength and deformation behavior of clay soils," *Eng Geol*, vol. 244, pp. 125–131, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.enggeo.2018.07.028.

[32] V. Sivakumar, J. Zaini, D. Gallipoli, and B. Solan, "Wetting of compacted clays under laterally restrained conditions: Initial state, overburden pressure and mineralogy," *Geotechnique*, vol. 65, no. 2, pp. 111–125, Feb. 2015, doi: 10.1680/geot.14.P.019.

[33] U. Veena and N. James, "Natural Rubber Latex for Improving Ductility Characteristics of Soil: A Preliminary Experimental Investigation," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 40, no. 9, pp. 4419–4446, Sep. 2022, doi: 10.1007/s10706-022-02162-1.

Dicle University
Journal of Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/dumf
duje.dicle.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

Bodrum Katlı Betonarme Yüksek Yapılarda Yapı-Kazık-Zemin Etkileşiminin Alt Sistem Yaklaşımı ile 2B ve 3B Analiz Yöntemleriyle Değerlendirilmesi

Evaluation of Structure-Pile-Soil Interaction in Basement-Story Reinforced Concrete High-Rise Buildings Using 2D and 3D Analysis Methods with Substructure Approach

Hüseyin Doğan[1*], Taha Taşkıran[2]

[1] Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, huseyinmetu@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-7163-4631

[2] Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, ttaskiran@aybu.edu.tr
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8444-0094

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 8 Ocak 2025
Revizyon 12 Mart 2025
Kabul 27 Mart 2025
Online 30 Haziran 2025

Anahtar Kelimeler:

Deprem; TBDY-2018; Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi; Alt Sistem Yaklaşımı, Yöntem-III.

ÖZ

Türkiye, Avrasya, Afrika ve Arap tektonik plakalarının etkileşim noktasında yer alan aktif bir sismik kuşakta bulunmakta olup, artan nüfus ve sınırlı arazi kullanımı güvenli yapı tasarımını zorunlu kılmaktadır. Özellikle kentleşmeyle birlikte yüksek katlı yapıların yaygınlaşması, yapı periyodunun artmasına ve zayıf zeminlerde deprem dalgalarının büyütülmesine neden olmuştur. Bu durum, yapı-kazık-zemin etkileşiminin detaylı bir şekilde incelenmesini gerektirmiştir. 6 Şubat 2023'te Kahramanmaraş'ta meydana gelen Mw 7.7 ve Mw 7.6 büyüklüğündeki depremler, zemin özelliklerinin deprem dalgalarının davranışına etkisini açıkça ortaya koymuştur. Bu çalışmada, TBDY-2018'e uygun ZD sınıfı zemin üzerine inşa edilmesi planlanan 17 katlı bodrumlu bir betonarme yapının yapı-kazık-zemin etkileşimi, alt sistem yaklaşımıyla iki (2B) ve üç (3B) boyutlu analizlerle incelenmiştir. Analiz sonuçları, bodrumlu yapılarda 3B analizlerin kazıklardaki iç kuvvetleri daha olumsuz gösterdiğini ortaya koymuş, bu durum dinamik yapı-kazık-zemin etkileşiminde 3B yaklaşımın önemini vurgulamıştır. Elde edilen bulgular, deprem etkisi altındaki kazıklı temel tasarımlarında dinamik etkilerin kapsamlı şekilde ele alınmasının, yapı güvenliği açısından kritik bir gereklilik olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, deprem bölgelerinde güvenli tasarım yaklaşımlarına katkı sağlamaktadır.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 8 January 2025
Received in revised form 12 March 2025
Accepted 27 March 2025
Available online 30 June 2025

Keywords:

Earthquake; TBDY-2018; Structure-Pile-Soil Interaction; Substructure Approach; Method III

DOI: 10.24012/dumf.1615806

ABSTRACT

Turkey is located in an active seismic zone at the intersection of the Eurasian, African, and Arabian tectonic plates, where increasing population and limited land availability necessitate safe structural design. Urbanization has led to the widespread construction of high-rise buildings, increasing structural periods and amplifying seismic waves in weak soil conditions. This has highlighted the need for detailed investigations of structure-pile-soil interaction. The Mw 7.7 and Mw 7.6 earthquakes that struck Kahramanmaraş on February 6, 2023, demonstrated the significant impact of soil properties on seismic wave behavior. In this study, the structure-pile-soil interaction of a planned 17-story reinforced concrete building with a basement, designed on ZD-class soil in accordance with TBDY-2018, was analyzed using subsystem approaches in two (2D) and three (3D) dimensions. The results revealed that in basement structures, 3D analyses yield more critical internal forces in piles, emphasizing the importance of a 3D approach in dynamic structure-pile-soil interaction for such structures. The findings underline that a comprehensive assessment of dynamic effects in pile foundation designs under seismic conditions is crucial for structural safety. This study contributes significantly to design approaches based on soil-structure interaction in earthquake-prone regions.

* Sorumlu Yazar

1.Giriş

Türkiye, tektonik levhaların kesişim noktasında yer aldığı için son derece aktif bir deprem bölgesindedir ve bu durum ülkenin sismik aktivitesini ve deprem riskini doğrudan etkileyerek yüksek deprem riski oluşturur. Bu jeolojik konum hem bilimsel araştırmalar hem de mühendislik uygulamaları açısından kritik öneme sahiptir ve yapıların ve altyapıların sismik güvenliğini sağlamak için yenilikçi mühendislik çözümlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Son yıllarda, bilimsel ve teknolojik ilerlemeler ile artan nüfus ve değişen sosyal-ekonomik ihtiyaçlar, büyük şehirlerde yüksek katlı binaların ve sanayi bölgelerinde karmaşık yapılar inşa edilmesine yol açmıştır. Bu büyüme, daha büyük ve karmaşık mühendislik projelerinin ortaya çıkmasına, yapı yüklerinin artmasına ve temel mühendisliği ile yapı tasarımı konusunda yeni taleplerin doğmasına sebep olmuştur.

Bu bağlamda, zemin iyileştirme ve kazık temeli tasarımları gibi mühendislik çözümleri, yüksek yapıların güvenli bir şekilde inşa edilmesi için vazgeçilmez hale gelmiştir. Kazıklar, zemine doğrudan temas eden elemanlar olarak, yapı-kazık-zemin etkileşimi kavramı ile yapı üzerindeki etkilerini gösterir. Kazıklı yapıların performansı, zemin özelliklerine bağlı olarak değişebilir ve bu etkileşim, yapıların deprem anındaki dayanıklılığı için kritik bir rol oynar. Yapı-kazık-zemin etkileşiminin değerlendirilmesi, yapıların sismik performansını ve güvenliğini analiz etmek için detaylı bir inceleme gerektirir.

Türk Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) kapsamında, kazık-zemin-yapı etkileşimini değerlendirmek için üç temel yöntem önerilmektedir: Yöntem I, üstyapı, kazık ve zemin bileşenlerini tek bir analiz modelinde bütünleşik olarak ele alır ve tüm sistemin dinamik etkileşimlerini kapsamlı şekilde analiz eder. Yöntemler II ve III ise, üstyapı ve alt-yapı için ayrı analiz modelleri geliştirip, sonuçları birleştirir. Özellikle Yöntem III, kazıklı temellerin performansını detaylı bir şekilde inceleyerek yapı-kazık-zemin etkileşimini daha kısa sürede doğru bir şekilde değerlendirmeyi amaçlar.

Bu çalışmada, Hatay İli Kumlu İlçesi'nde ZD sınıfı zemin üzerine, TBDY-2018 standartlarına uygun olarak inşa edilmesi planlanan 17 katlı bodrumlu betonarme yapının yapı-kazık-zemin etkileşimi, TBDY-2018 Yöntem-III çerçevesinde alt sistem yaklaşımı kullanılarak, 2B ve 3B analizlerle değerlendirilecektir (Şekil 1).

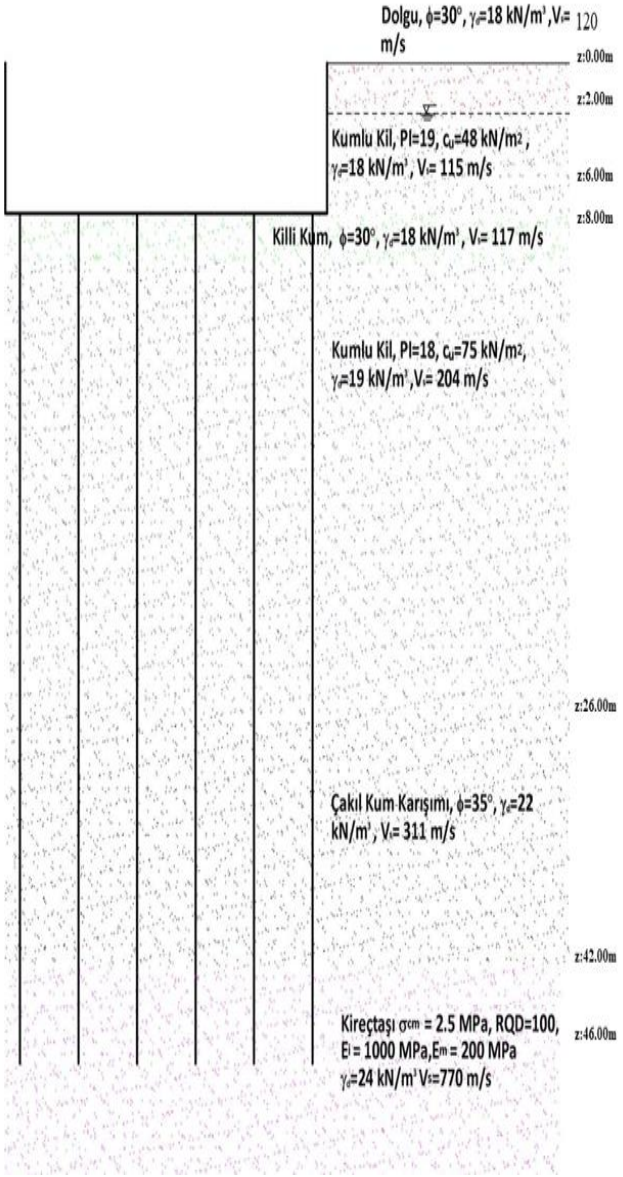
Şekil 1. Kumlu İlçesi, Hatay İli, Türkiye

2. Arazi zemin modelinin oluşturulması

2.1.Zemin araştırmaları

Yapının inşa edilmesinin planlandığı parselde zemin modelinin oluşturulması kapsamında, zemin profilini ve bu profildeki zeminlerin özelliklerini belirlemek amacıyla her biri 30 metre derinliğinde beş adet sondaj yapılmıştır. Sondajlara ek olarak, sahada gerçekleştirilen iki adet MASW (Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizi) ölçümü ile sınırlı derinliklere kadar zemin tabakalarının kayma dalgası hızları belirlenmiştir. Ayrıca, iki farklı noktada gerçekleştirilen mikro tremor deneyleri ile zeminin hâkim titreşim periyotları tespit edilmiştir. Sondaj sırasında alınan bozulan ve bozulmamış numuneler üzerinde sınıflandırma ve mukavemet deneyleri yapılmıştır. Saha ve laboratuvar deneylerinden elde edilen zemin tabakalarına ait parametreler, Şekil 2'de idealize edilmiş zemin profili olarak gösterilmiştir.

Arazi stratigrafisi, farklı zemin türlerinin belirgin bir tabakalaşma gösterdiğini ortaya koymaktadır. Yüzeyde, yaklaşık 2 metre kalınlığında bir dolgu tabakası bulunmaktadır. Bu dolgunun altında, yüzey dolgusu ile daha derin sedimanter yapılar arasında geçiş zonu oluşturan, 2 ila 6 metre derinliğe kadar uzanan kumlu kil tabakaları yer almaktadır. Daha derin seviyelerde, 6 ila 8 metre kalınlığında kil içeren bir kum tabakası bulunmakta olup, bunu 8 ila 26 metre derinliklere kadar uzanan hafif kumlu kil tabakası takip etmektedir. Bu tabakalar, 26 ila 36 metre derinlikleri arasında çakıl-kum karışımı ile kesintiye uğramakta, 36 metreden itibaren ise, 46 metredeki kazık ucu dahil olmak üzere, kireçtaşı birimi gözlenmektedir. Ayrıca, yüzeyden yaklaşık 2 metre derinlikte yer alan sığ su tablası, zeminlerin mekanik davranışını ve profil içerisindeki yeraltı suyu hareketini etkileyerek, alanın hidrojeolojik koşulları üzerinde önemli bir rol oynamaktadır.



Şekil 2. İdealize Zemin Profili

2.2 Yerel Zemin Sınıfı ve Tasarım Spektrumunun Belirlenmesi

Türk Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) kapsamında, tasarım spektrumlarının belirlenmesinde Türkiye Deprem Tehlike Haritaları (TDTH) kullanılmaktadır. Genel kaya zeminler ($(V_S)_{30}$=760m/s) için boyutsuz kısa periyot (Ss) ve 1.0 saniyelik spektral ivme katsayıları (S_1) TDTH'den elde edilir. Bu haritalara e-devlet üzerinden AFAD'ın web sitesinden (https://tdth.afad.gov.tr) ulaşılabilir.

Yerel zemin etkilerinin değerlendirilmesi için öncelikle uygun yer hareketi düzeyinin seçilmesi gereklidir. Bu çalışmada, %10 aşılma olasılığına ve 475 yıllık yinelenme aralığına karşılık gelen Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD-2) seçilmiştir. Yerel zemin etkilerini hesaba katmak için S_S ve S_1 katsayıları, TBDY 16.4'e göre yerel zemin katsayıları (F_S ve F_1) kullanılarak tasarım spektral ivme katsayılarına (S_{DS} ve S_{D1}) dönüştürülür.

Saha ve laboratuvar çalışmalarında temel veya kazık başı seviyesinin altındaki 30 metre için kayma dalgası hızı $(V_S)_{30}$, düzeltilmiş standart penetrasyon darbe sayısı ($N_{60,30}$) ve/veya drenajsız kayma mukavemeti ($c_{u,30}$) belirlenir. TBDY'ye göre zeminler ZA'dan ZF'ye kadar sınıflandırılır. Bu çalışmada, kazık uçlarının oturduğu kaya biri için V_S=770 m/s alınmış ve ZB sınıfı olarak sınıflandırılmıştır. Temel altındaki zemin özellikleri $N_{60,30}$=17N ve $(V_S)_{30}$=229m/s olarak belirlenmiş ve zemin ZD sınıfı olarak tanımlanmıştır.

2.3 Deprem Yer Hareketi Spektrumu

Yapı-kazık-zemin etkileşim analizinin gerçekleştirileceği, Hatay ili Kumlu ilçesinde bulunan bina için DD-2 Deprem Yer Hareketi Düzeyi için Türkiye Deprem Tehlike Haritaları) üzerinden alınan S_S ve S_1 değerleri aşağıdaki gibidir:

S_S=0.901, S_1=0.245.

Yerel zemin sınıfı ZD için TBDY'nin 2.1 ve 2.2 numaralı tablolarından elde edilen zemin katsayıları:

F_S=1.140, F_1=2.110

Tasarım spektral ivme katsayıları şu şekilde hesaplanmıştır:

$S_{DS}=Ss\times Fs$=1.027, $S_{D1}=S_1\times F_1$=0.517.

Yatay tasarım spektrumu için köşe periyotları T_A ve T_B, TBDY 2018'in 3.1 numaralı denklemi kullanılarak hesaplanmıştır:

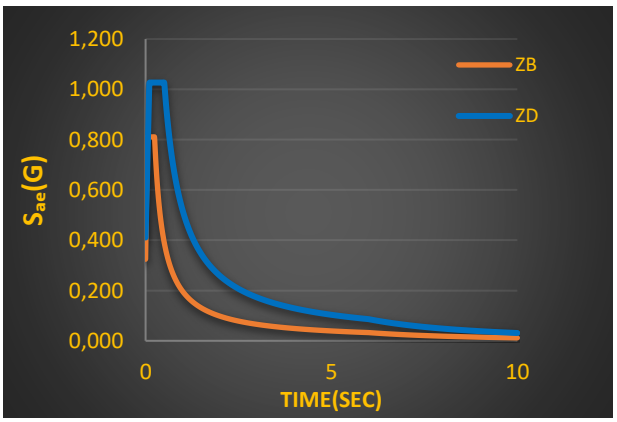
Doğal titreşim periyoduna bağlı olarak yatay tasarım spektral ivme değerlerinin ($S_{ae(T)}$) değişimi, TBDY 2018'in 3.2 numaralı denklemi kullanılarak yerçekimi ivmesi cinsinden belirlenmiştir. Yatay elastik tasarım spektrumu Şekil 3'te verilmiştir:

Yerel zemin sınıfı ZB için TBDY'nin 2.1 ve 2.2 numaralı tablolarından elde edilen zemin katsayıları:

F_S=0.900, F_1=0.800.

ZD için yukarıda belirtilen adımların aynısı takip edilerek ZB için spektrum hesaplanmış ve Şekil 3'de gösterilmiştir. DD-2 Deprem Yer Hareketi Düzeyi için tasarım spektral ivme katsayıları:

- Yerel zemin sınıfı ZB: S_{DS}=0.811, S_{D1}=0.196.
- Yerel zemin sınıfı ZD: S_{DS}=1.027, S_{D1}=0.517.



Şekil 3. ZB ve ZD yatay elastik tasarım ivme spektrumları.

3. Deprem Etkisi Altında Sahaya Özel Zemin Davranış Analizleri

3.1 Proje Alanı İçin Deprem Kayıtlarının Seçimi ve Spektral Uyumluluk

Sahaya özgü zemin davranışı analizleri için, TBDY 2018'de belirtilen tasarım ivme spektrumuna uyumlu ve $(V_S)_{30}$=760m/s için geçerli en az 11 deprem kaydına ihtiyaç duyulmaktadır. Deprem kayıtlarının seçimi, TBDY 2018'in 2.5. bölümünde belirtilen basit ölçeklendirme veya spektral uyumluluk yöntemlerine göre yapılmıştır. Bir ve iki boyutlu analizlerde en az 11 deprem kaydı, üç boyutlu analizlerde ise 11 set kayıt seçilmesi gerekmektedir. Aynı depremden alınan kayıt sayısı üç ile sınırlandırılmıştır. Kayıt seçiminde deprem büyüklüğü, fay uzaklığı, kaynak mekanizması ve yerel zemin koşulları göz önünde bulundurulmuştur.

Proje alanına en yakın deprem kaynakları, Doğu Anadolu Fay Zonu'ndaki Amanos segmentidir ve bu bölge 10-30 km uzaklıktadır. Bu segmentten Mw = 6.0-7.5 büyüklüğündeki, 0-30 km mesafedeki bir kayıt seçilmiştir. Ayrıca, Antakya Fayı (30-50 km) ve Pazarcık segmentinden (30-120 km) Mw = 6.5-8.0 büyüklüğündeki depremler için on kayıt değerlendirilmiştir.

3.2 Deprem Kayıtlarının Yerel Zemin Koşullarına Uyumu

Deprem kayıtlarının seçimi sırasında, sahanın zemin profiline ait $(V_S)_{30}$ değeri temel kriter olarak kullanılmıştır. Ancak bu koşul sağlanamadığında, genel kaya (outcrop) kayıtları tercih edilmiş ve bu kayıtlar zemin yüzeyine aktarılıp simüle edilmiştir. Deprem kayıtları AFAD (deprem.gov.tr) ve PEER (ngawest2.berkeley.edu) veri tabanlarından temin edilmiştir. Kumlu ve çevresindeki kayıtlar incelenmiş, 11 adet kayıt PEER veri tabanından seçilmiştir. (Tablo 1)

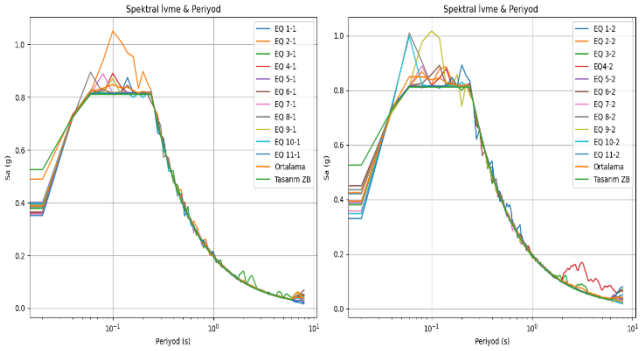
TBDY 2018'in 2.5.3. bölümüne göre, seçilen 11 adet deprem kayıtların Kuzey-Güney ve Doğu-Batı her iki yön içinde spektrumlarının ortalaması, tasarım spektrumu ile uyumlu hale getirilmiş ve tüm periyotlar için tasarım spektrumu değerlerinin altına düşmeyecek şekilde uyuşum sağlanmıştır.

Tablo 1. Seçilen Deprem Kayıtları ve Detayları

#	PEER Kayıt No	Deprem Adı	Yıl	Mw	Odak mekanizması	İstasyon	Rrup (km)	$(V_S)30$ (m/s)	H1:N-S	H2:E-W	Ölçek
1	RSN2929	Chi-Chi_ Taiwan-04	1999	6.2	doğrultu atımlı	TTN042	69 (30-90)	845.34	EQ 1-1	EQ 1-2	7.14
2	RSN897	Landers	1992	7.28	doğrultu atımlı	Twentynine Palms	41.43 (30-90)	635.01	EQ 2-1	EQ 2-2	5.30
3	RSN5993	El Mayor-Cucapah_ Mexico	2010	7.2	doğrultu atımlı	El Monte County Park	104.91 (90-200)	805	EQ 3-1	EQ 3-2	9.30
4	RSN6041	El Mayor-Cucapah_ Mexico	2010	7.2	doğrultu atımlı	San Diego Road Dept	110.95 (90-200)	827	EQ 4-1	EQ 4-2	7.60
5	RSN1763	Hector Mine	1999	7.13	doğrultu atımlı	Anza - Pinyon Flat	89.98 (30-90)	724.89	EQ 5-1	EQ 5-2	9.07
6	RSN1836	Hector Mine	1999	7.13	doğrultu atımlı	Twentynine Palms	42.06 (30-90)	635.01	EQ 6-1	EQ 6-2	4.58
7	RSN2753	Chi-Chi_ Taiwan-04	1999	6.2	doğrultu atımlı	CHY102	39.32 (30-90)	804.36	EQ 7-1	EQ 7-2	7.84
8	RSN3925	Tottori_ Japan	2000	6.61	doğrultu atımlı	OKYH07	15.23 (0-30)	940.2	EQ 8-1	EQ 8-2	2.40
9	RSN3930	Tottori_ Japan	2000	6.61	doğrultu atımlı	OKYH12	79.30 (30-90)	719.57	EQ 9-1	EQ 9-2	7.40
10	RSN3957	Tottori_ Japan	2000	6.61	doğrultu atımlı	SMNH13	96.93 (90-200)	650	EQ 10-1	EQ 10-2	8.70
11	RSN6963	Darfield_ New Zealand	2010	7	doğrultu atımlı	RPZ	57.65 (30-90)	638.39	EQ 11-1	EQ 11-2	6.71

3.3. Zaman tanım alanı analizi ve spektral uyumluluk

Bu çalışmada, seçilen 11 deprem kaydının her iki yönü, öncelikle basit ölçekleme yöntemiyle tasarım spektrumuna ölçeklendirilmiş, ardından Seismomatch yazılımı kullanılarak tasarım spektrumu ile uyumlu hale getirilmiştir. Kayıtlar, spektral eşleme yöntemiyle tasarım spektrumuna uyarlanmış ve böylece varyans azaltılmıştır. Ancak bu yöntem, kayıtların gerçekçiliğini belirli ölçüde azaltabilir. Uyarlanan deprem kayıtlarının yanıt spektrumları, ortalama spektrum ve tasarım spektrumu Şekil 4'te sunulmuştur



Şekil 4. On bir deprem kaydının tasarım spektrumuna ölçeklenmiş tepki spektrumları: Sol: H1 Kuzey-Güney yönü Sağ: H2 Doğu-Batı yönü

3.4 Zaman Tanım Alanında Zemin Davranışının Modellemesi

Saha tepki analizi, sismik dalgaların belirli bir sahadan geçişi sırasında maruz kaldığı büyütme veya sönümlenme etkilerini değerlendirerek, zemin koşullarının sismik davranış ve yapısal tepkiler üzerindeki etkisini anlamaya yönelik kritik bilgiler sağlar. Bu süreç; zemin özelliklerinin (ör. kayma dalgası hızı, yoğunluk, sönümleme) karakterize edilmesi, tehlike analizi veya kayıtlarından elde edilen giriş hareketlerinin tanımlanması ve 1B, 2B veya 3B (doğrusal, eşdeğer doğrusal veya doğrusal olmayan) sayısal yöntemlerle dalga-zemin etkileşimlerinin modellenmesini içerir. Analiz sonuçları, dalga büyütmesi, deformasyon ve frekans değişimlerinin anlaşılmasını sağlayarak, yapı ve altyapının beklenen sismik kuvvetlere karşı dayanıklılığı için tasarım süreçlerini yönlendirir.

Zaman tanım alanında yapılan dinamik saha analizleri, Deepsoil programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde, Kondner ve Zelasko tarafından geliştirilen ve daha sonra Matasovic tarafından iyileştirilen hiperbolik model esas alınmıştır. Modelde kayma gerilmesi (τ) ile kayma deformasyonu (γ) arasındaki ilişki aşağıdaki denklemle tanımlanır:

$$\tau = \frac{G_{max}\gamma}{1 + \beta\left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^s} \quad (1)$$

Bu denklemde:

G_{max}: Maksimum kayma modülü,

γ: Kayma deformasyonu,

γr: Referans kayma deformasyonu,

β ,s: Hiperbolik modelin şekil parametresidir.

Maksimum kayma modülü G_{max}, elastik ilişki kullanılarak kayma dalgası hızı V_s ve yoğunluk (ρ) cinsinden şu şekilde hesaplanır:

$$G_{max} = \rho {V_s}^2 \quad (2)$$

Laboratuvar testlerinin mümkün olmadığı durumlarda, literatürden alınan gerilme-deformasyon eğrileri kullanılır. Bu çalışmada, artan efektif gerilmenin derinlikle değişimini dikkate alan Darendeli (2001) eğrileri tercih edilmiştir. Belirli derinliklerdeki gerilme-deformasyon eğrileri, Şekil 5'te sunulmuştur.

Dinamik serbest saha analizlerinde her zemin tabakasının iletebileceği maksimum frekans, kayma dalgası hızı (V_s) ve tabaka kalınlığı (H) ile belirlenir:

$$f_{max} = \frac{V_s}{4H} \quad (3)$$

Frekansı f_{max}'ın üzerinde olan dalgalar zemin tabakasından iletilemez. Hesaplamalarda, herhangi bir tabaka için kesme frekansının en az 25−30 Hz olması önerilir. Ancak, giriş hareketinin frekans içeriğine ve beklenen deformasyon seviyelerine bağlı olarak bu değer daha büyük olabilir. Hesaplamaların doğruluğunu sağlamak amacıyla, düşük kayma dalgası hızına sahip tabakalarda maksimum frekansı f_{max}>20 Hz tutmak için, zemin profili 40 metre derinliğe kadar 40 alt tabakaya bölünmüştür.

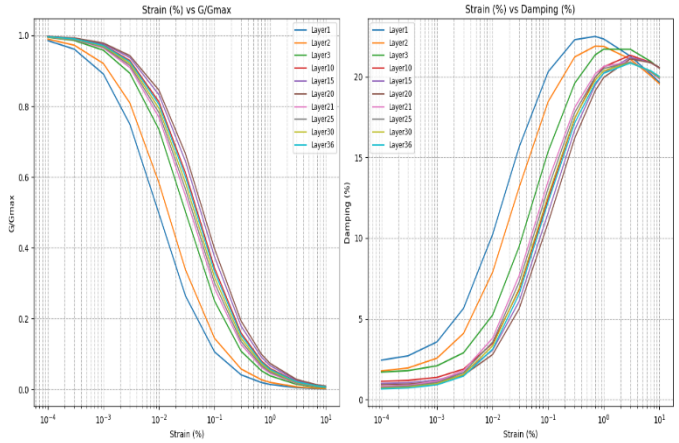
Yanal toprak basıncı katsayısı K_0 aşağıdaki denklem ile hesaplanır ve bu parametre zemin için hesaplanan değerler aşağıdaki tabloda verilmiştir.

$$K'_0 = [1 - \sin(\emptyset')] * OCR^{\sin(\emptyset')} \quad (4)$$

Burada:

- ϕ': Zeminin efektif içsel sürtünme açısıdır.

Efektif gerilmeler, toplam gerilmelerden boşluk suyu basıncı çıkarılarak hesaplanır. Ortalama ana gerilmenin hesaplanabilmesi için, dinlenme durumundaki yanal toprak basıncının belirlenmesi gerekir. Bu hesaplama için Jaky (1944) ve Mayne & Kulhawy (1982) formülleri kullanılmıştır. Deepsoil programına girdi olarak kullanılan parametreler Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 5. Kayma deformasyonu ile G/G_{max} ve sönümleme oranı ilişkisi.

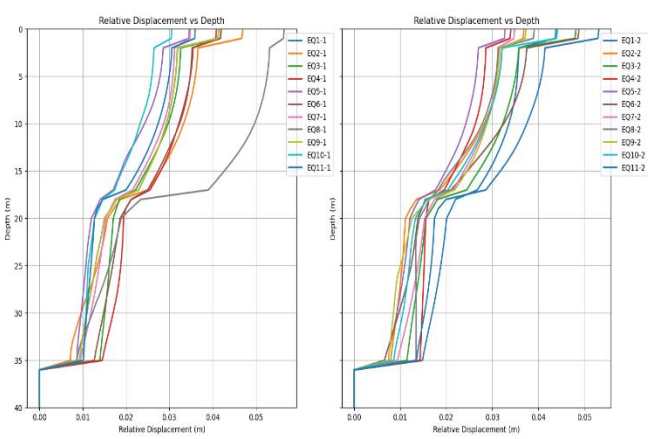
Tablo 2. Zemin Model Parametreleri

Katman	Z(derinlik)	Kalınlık(m)	Zemin Sınıfı	γ (kN/m3)	PI (%)	OCR	Vs	fmax	Ko
1	1	1	SC	18		1	117	29.3	0.455
2	2	1	SC	18		1	117	29.3	0.455
3	3	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
4	4	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
5	5	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
6	6	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
7	7	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
8	8	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
9	9	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
10	10	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
11	11	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
12	12	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
13	13	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
14	14	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
15	15	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
16	16	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
17	17	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
18	18	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
19	19	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
20	20	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
21	21	1	GW	22		1	311	77.8	0.426
22	22	1	GW	22		1	311	77.8	0.426
23	23	1	GW	22		1	311	77.8	0.426
24	24	1	GW	22		1	311	77.8	0.426
25	25	1	GW	22		1	311	77.8	0.426
26	26	1	GW	22		1	311	77.8	0.426
27	27	1	GW	22		1	311	77.8	0.426
28	28	1	GW	22		1	311	77.8	0.426
29	29	1	GW	22		1	311	77.8	0.426
30	30	1	GW	22		1	311	77.8	0.426
31	31	1	GW	22		1	311	77.8	0.426
32	32	1	GW	22		1	311	77.8	0.426
33	33	1	GW	22		1	311	77.8	0.426
34	34	1	GW	22		1	311	77.8	0.426
35	35	1	GW	22		1	311	77.8	0.426
36	36	1	GW	22		1	311	77.8	0.426
37	37	1	Kireçtaşı	24		1	770	193	0.293
38	38	1	Kireçtaşı	24		1	770	193	0.293
39	39	1	Kireçtaşı	24		1	770	193	0.293
40	40	1	Kireçtaşı	24		1	770	193	0.293

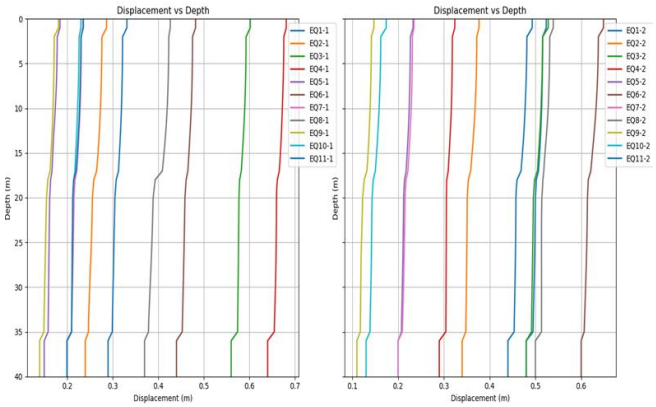
3.5 Maksimum Zemin Yer Değiştirmeleri

Deepsoil programında, dört farklı zemin tabakası için çeşitli zemin profilleri oluşturulmuştur. Kazık elemanları için her 1 metrede bir p-y yay tanımı yapıldığından, zemin tabakaları da 1 metre kalınlıkta tanımlanmıştır.

Deepsoil programı kullanılarak serbest saha analizlerini gerçekleştirmek amacıyla, kazık düğüm noktalarındaki zaman tanımına bağlı yer değiştirmeler, kaya zemini referans alarak 11 farklı deprem kaydı ve iki yön için hesaplanmıştır. Bu düğüm noktalarında elde edilen bağıl yer değiştirmeler, kaya zemindeki deprem kaydından kaynaklanan yer değiştirmelerle toplanarak maksimum zarf elde edilmiştir. Kazık düğüm noktaları arasında 1 metre yükseklik farkı için hesaplanan rölatif ve toplam yer değiştirmelerin zamanla değişimindeki maksimum zarfları, Şekil 6 ve 7'de sıra ile gösterilmektedir.



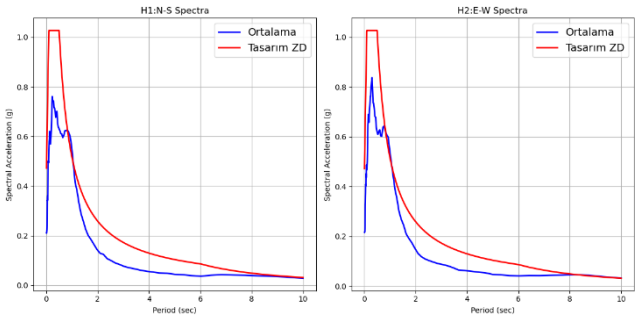
Şekil 6. Serbest saha analizlerinde kullanılan 11 deprem kaydı sonucunda elde edilen rölatif yatay zemin yer değiştirmelerinin derinlikle değişimi: Sol Grafik (H1): Kuzey-Güney yönündeki yatay yer değiştirme, Sağ Grafik (H2): Doğu-Batı yönündeki yatay yer değiştirme.



Şekil 7. Serbest saha analizlerinde kullanılan 11 deprem kaydı sonucunda elde edilen toplam yatay zemin yer değiştirmelerinin derinlikle değişimi: Sol Grafik (H1): Kuzey-Güney yönündeki yatay yer değiştirme, Sağ Grafik (H2): Doğu-Batı yönündeki yatay yer değiştirme.

3.5 Eylemsizlik Etkileşimi Analizi İçin Tasarım Spektrumunun Belirlenmesi

TBDY -2018'de belirtilen Yöntem III'e göre, eylemsizlik etkileşimine dayalı ivme spektrumu, serbest saha davranış analizlerinden elde edilen temel seviyedeki ivme spektrumlarının ortalaması alınarak hesaplanır. Ancak, bu ortalama spektrumun, TBDY -2018'de tanımlanan tasarım spektrumunun ordinatlarından büyük olması gerekmektedir. Şekil 8'de görüldüğü üzere, kaya zemininden temel seviyesine kadar yükseltilen ivme spektrumlarının ortalaması, TBDY-2018'de verilen deprem spektrumundan daha düşük kalmaktadır. Bu nedenle, eylemsizlik etkileşimi için TBDY-2018 tasarım spektrumu kullanılmıştır.

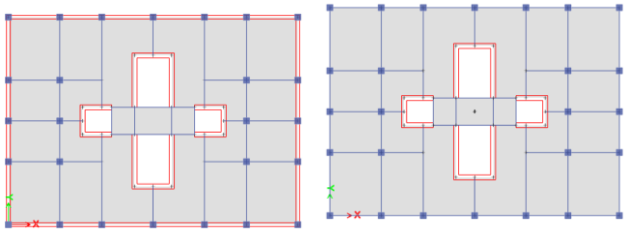


Şekil 8. Serbest saha analizlerinden elde edilen temel taban seviyesindeki ivme kayıtlarının tepki spektrumları: Sol: H1: Kuzey-Güney yönü, Sağ: H2: Doğu-Batı yönü.

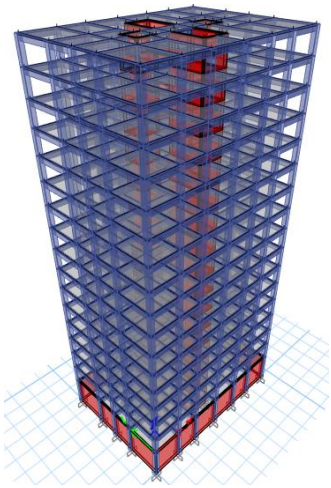
4. Bina Modeli Bilgileri

Yapı, Hatay İli Kumlu İlçesi'nde yer almakta olup bodrum, zemin ve 15 tipik kat olmak üzere toplam 17 kattan oluşmaktadır. Bodrum kat yüksekliği 4,5 metre, tipik kat yükseklikleri ise 3,0 metredir. Konut amaçlı tasarlanan yapının boyutları 17,30 metre genişlik ve 23,90 metre uzunluk şeklindedir. Taşıyıcı sistem, yüksek sünekliğe göre tasarlanmış betonarme çerçeveler ve perdelerden oluşmaktadır.

Yapı öncelikle yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmamış, yapı temel seviyesinde ankastre olarak varsayılmıştır. Boyutlandırmalar, TBDY-2018 ve TS-500'de belirtilen asgari kesit gereklilikleri ile TS-498'de tanımlanan yük şartlarına uygun şekilde yapılmıştır. Bodrum kat planı ve tipik kat planı Şekil 9'de, üç boyutlu hesap modeli ise Şekil 10'te gösterilmektedir.



Şekil 9. Bodrum kat planı ve tipik kat planı



Şekil 10. Üç boyutlu hesap modeli

Yapının taşıyıcı elemanları olan radye temel, perde duvarlar, kolonlar, kirişler ve döşemeler için 28 günlük silindirik basınç dayanımı 40 MPa olan C40 sınıfı beton kullanılmıştır. Kazık elemanları için ise 28 günlük silindirik basınç dayanımı 35 MPa olan C35 sınıfı beton tercih edilmiştir. Donatı çeliği, minimum akma dayanımı B420C MPa olan malzeme özelliklerine sahiptir.

Normal katlar için sabit yük 2 kN/m², dış duvar yükü 8 kN/m, iç duvar yükü 6 kN/m ve hareketli yük 2 kN/m² olarak alınmıştır. Merdivenlerde ise hareketli yük 3,5 kN/m² olarak belirlenmiştir. Çatı katında sabit yük 1,5 kN/m² ve hareketli yük 1,5 kN/m² olarak hesaplanmıştır. Temel seviyesinde sabit yük 5 kN/m², hareketli yük ise 5 kN/m² olarak alınmıştır. Kat kütleleri, ETABS programında G+0.3Q yüklemesi dikkate alınarak tanımlanmıştır.

Konut amaçlı tasarlanan yapı için Bina Önem Katsayısı I=1 olarak belirlenmiştir. DD-2 deprem yer hareketi düzeyinde, yapıya ait kısa periyot spektral ivme katsayısı S_{ds}=1.027 olarak hesaplanmış ve Deprem Tasarım Sınıfı (DTS) 1 olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, yapı yüksekliği sınıfı BYS=3 olarak belirlenmiştir. TBDY 2018'e göre, yeni inşa edilecek betonarme yapılara ilişkin yapı performans hedefleri ve bu hedeflere uygun değerlendirme ile tasarım yaklaşımları Tablo 3'te sunulmaktadır.

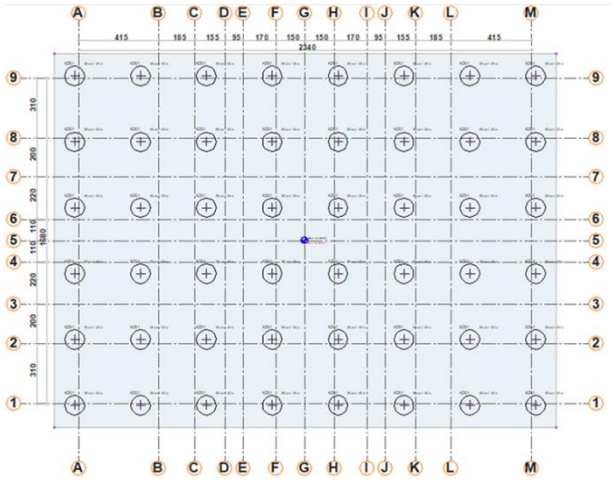
Tablo 3. Yeni yapılacak yerinde dökme betonarme, ön üretimli betonarme ve çelik binalar (Yüksek Binalar Dışında – BYS ≥ 2).

Deprem Yer H. Düzeyi	DTS = 1,1a[1], 2, 2a[1], 3, 3a, 4, 4a		DTS = 1a[2], 2a[2]	
	Normal Performans Hedefi	Değerlendirme/Tasarım Yaklaşımı	İleri Performans Hedefi	Değerlendirme/Tasarım Yaklaşımı
DD-3	--	--	SH	ŞGDT
DD-2	KH	DGT[5]	KH	DGT[3,4]
DD-1	--	--	KH	ŞGDT

5. Kazıklı Temellerin Tasarımı

Yapı temeli için 40 metre uzunluğunda ve 100 santimetre çapında kazıklar tasarlanmış olup, C35 beton ve B420C çelik malzemeleri kullanılacaktır. Kazıklar arası mesafe 3,40 metre olarak belirlenmiş, yerleşim detayları Şekil 11'da sunulmuştur.

Kazıklı temellerin tasarımında, zemin davranışı TBDY-2018 Ek 16C'ye göre değerlendirilmiş ve zemin sınıfının en az ZD olması şartı sağlanmıştır. Yapı, TBDY-2018'de tanımlanan Yöntem III kapsamında değerlendirilmiş olup, tasarım gereksinimlerine göre Yöntem I veya II alternatif olarak kullanılabilir.



Şekil 11. Kazık yerleşim planı.

5.1 Deprem Yükleri Altında Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi Analizleri

Deprem etkileri altında yapı-kazık-zemin etkileşiminin analizi, zemin-yapı dinamiğinin anlaşılması ve deprem tasarımında güvenilir çözümler sunulması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, TBDY-2018 Yöntem-III çerçevesinde alt sistem yaklaşımı kullanılarak, yapı-kazık-zemin etkileşimi için hem iki boyutlu (2B) hem de üç boyutlu (3B) analizlere yönelik modeller oluşturulacaktır. Bu modeller, deprem etkileri altındaki kinematik ve eylemsizlik etkileşimlerin belirlenmesi ve analiz edilmesini sağlayacaktır.

5.1.1 Kinematik Etkileşim Analizi

TBDY 2018 kapsamında, farklı zemin türleri için p-y eğrilerinin seçimi tasarımcının inisiyatifine bırakılmamış ve bu konuda standart dahilinde belirlenmiş referanslar sunulmuştur. Bu yaklaşım, kazıkların yanal yükler altındaki davranışlarının doğru şekilde temsil edilmesi için önemli bir rehber sağlamaktadır. Örneğin, yumuşak kil (su < 50 kPa) için Matlock (1970) yöntemi, su seviyesi altındaki sert kil için Reese ve ark. (1975) yöntemi, su seviyesi üzerindeki sert kil için Welch ve Reese (1972) yöntemi ve kumlar için Reese ve ark. (1974) yöntemi kullanılmaktadır.

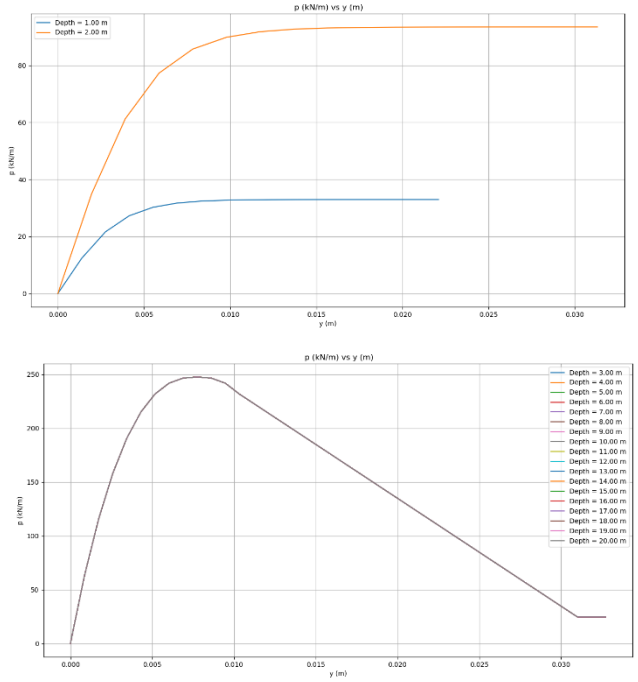
Bu yöntemlerle belirlenen p-y eğrileri Şekil 12 de sunulmaktadır. Bu eğriler kazıkların zeminle etkileşiminden kaynaklanan davranışlarını doğru şekilde yansıtmak amacıyla kinematik etkileşim analizlerinde uygulanmıştır. P-y yayları, yalnızca basınç yönünde çalışacak şekilde tasarlanmış ve zemin profili boyunca her 1 metrede bir kazık düğüm noktalarına atanmıştır. Grup etkileri nedeniyle kazıklardaki dayanım azalmaları, TBDY 2018 Denklem 16C.1 kullanılarak hesaplanan indirgeme faktörleri ile modellenmiştir.

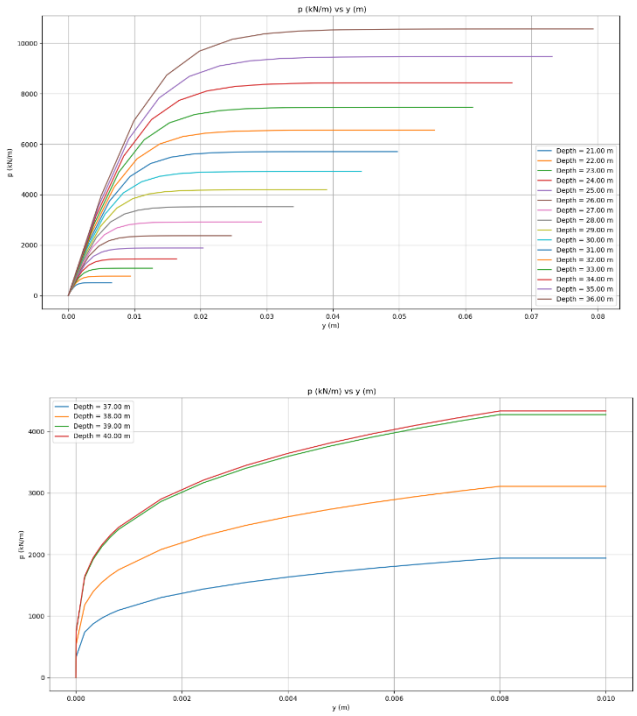
Kazıklar hem statik hem de dinamik yüklere dayanacak şekilde tasarlanıp inşa edilmelidir. Zeminin bu yüklere karşı koyma kapasitesi temel olarak iki faktöre bağlıdır: kazık yüzeyi boyunca gelişen sürtünme direnci ve kazık tabanında zemin tarafından sağlanan uç direnci. Bu dirençlerin kazık yer değiştirmesine bağlı olarak derinlikle nasıl değiştiğini modellemek amacıyla, zemin-kazık etkileşimini açıklayan t-

z eğrileri ve uç direncini gösteren q-z eğrileri kullanılır ve q-z eğrileri için, Amerikan Petrol Enstitüsü'nün (American Petroleum Institute, API) API WSD RP-2A (2000) standardında tanımlanan doğrusal olmayan ilişkilere başvurulabilir. (TBDY 2018, 16C.6.1b)

Yatay deprem etkisi altında, zemin davranışları DeepSoil yazılımı ile bir boyutlu serbest alan analizleri ile değerlendirilmiş ve her bir deprem kaydı için p-y yaylarının seviyelerinde maksimum mutlak yer değiştirme talepleri hesaplanmıştır. Elde edilen yer değiştirme zarfları kullanılarak, ETABS ve SAP2000 yazılımlarında oluşturulan kinematik etkileşim modellerinde doğrusal olmayan statik itme analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerden elde edilen eğilme momentleri TBDY 2018 kapsamında R=2.5 faktörüyle azaltılmış, ancak eksenel ve kesme kuvvetleri için azaltma uygulanmamıştır.

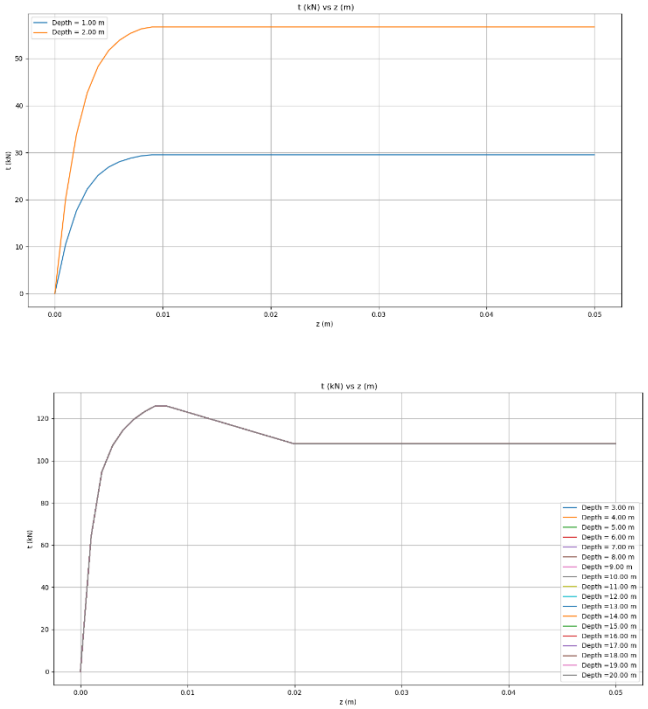
Analizler sonucunda, kazıkların her 1 metre derinlik aralığında p-y ve t-z eğrileri elde edilmiş ve bu eğriler, SAP2000 ve ETABS modellerine kazık derinliği boyunca düğüm noktalarına atanmış link elemanları olarak entegre edilmiştir. Kazık alt ucuna ise q-z eğrisi link eleman olarak tanımlanmıştır. Bu şekilde, kazık-zemin etkileşiminin doğru bir şekilde modellenmesi ve deprem etkileri altındaki dinamik davranışların güvenilir bir şekilde değerlendirilmesi sağlanmıştır.

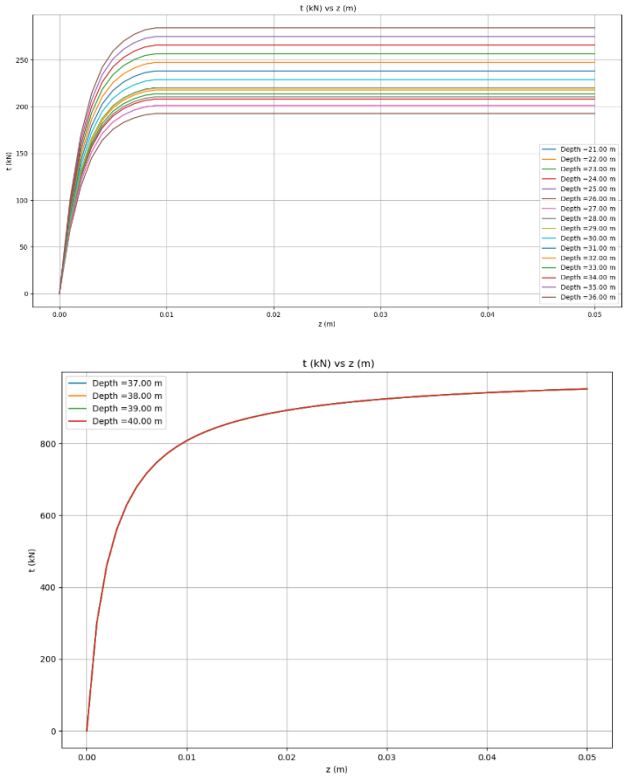




Şekil 12. P-y eğrileri.

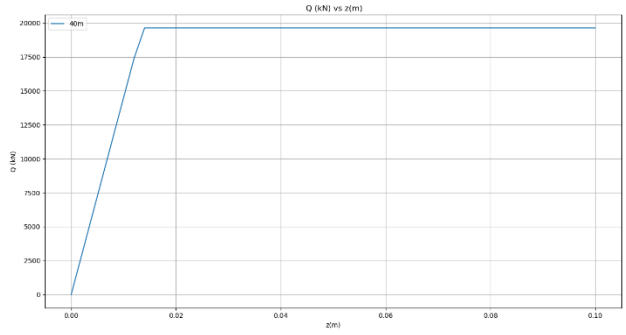
T-z yayları, kil içerikli kumlar, kum içerikli killer, çakıl-kum karışımları ve soketlenen bölgede bulunan kireçtaşı gibi zayıf kaya türleri dahil olmak üzere farklı zemin malzemeleri için tanımlanmıştır. Zemin tabakaları için belirlenen t-z eğrileri Şekil 13'de sunulmuştur.





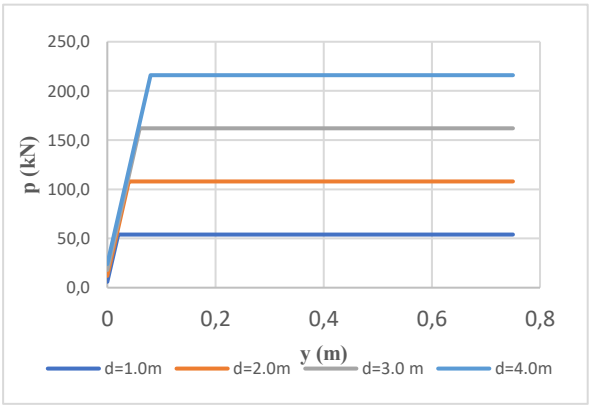
Şekil 13. T-z eğrileri

Q-z eğrileri, kazık ucunda tanımlanan tek tip bir yay olarak modellenmiştir. Q-z değerleri Şekil 14'de gösterilmiştir



Şekil 14. q-z eğrileri.

Bodrum kat çevre duvarlarında tanımlanacak p-y yaylarının belirlenmesinde, TBDY-2018 Örnekler Kitabı'nda (Yakut ve ark., 2018) önerilen yöntem uygulanmıştır. Bu yöntem kapsamında belirtilen adımlar titizlikle izlenerek, bodrum kat çevre duvarları için 1, 2, 3 ve 4 metre derinliklerdeki P-y eğrileri hesaplanmış ve Şekil 15'te sunulmuştur.

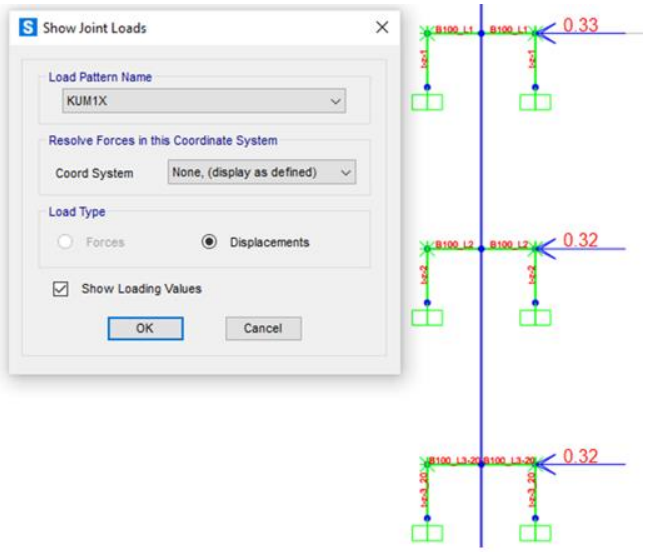


Şekil 15. Bodrum kat çevre duvarları p-y eğrileri.

5.1.2 Maksimum Yer Değiştirme Zarflarının Uygulanması

Maksimum yer değiştirme zarfları, serbest saha analizlerinden elde edilen veriler doğrultusunda belirlenmiş ve bu zarflar, zemin profili boyunca p-y yaylarının bulunduğu seviyelerdeki maksimum mutlak yer değiştirme taleplerini temsil etmektedir. DeepSoil programı kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde, yatay deprem etkisi altında temel kaya seviyesinden iki yönde uygulanan 11 farklı deprem kaydı ile zamana bağlı maksimum toplam yer değiştirme zarfı hesaplanmıştır (Şekil 7).

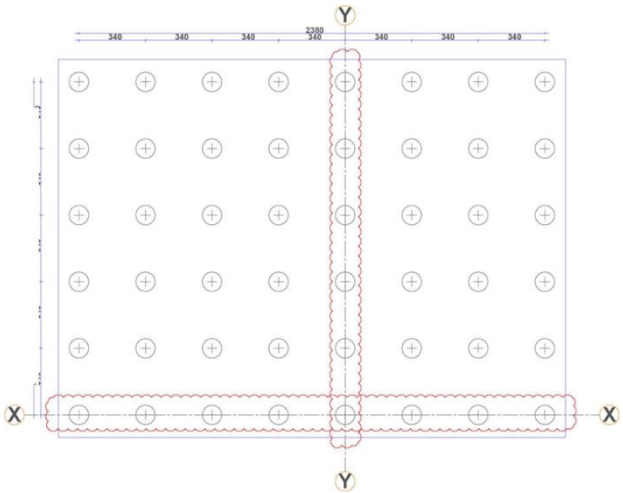
Elde edilen maksimum yer değiştirme zarfları, yapı-kazık-zemin etkileşimini doğru bir şekilde modellemek amacıyla ETABS ve SAP2000 analiz modellerine doğrudan aktarılmıştır. Bu işlem, kazık boyunca her bir düğüm noktasına uygun yer değiştirme değerlerinin atanması ile gerçekleştirilmiştir. Zarflar, kinematik etkileşim analizlerinde doğrusal olmayan statik itme analizlerinin yerdeğiştirme verisi olarak kullanılmıştır. Özellikle, kazık düğüm noktalarındaki p-y yaylarının uçlarına basınç yönünde uygulanan bu değerler, modeldeki zemin davranışının gerçekçi bir şekilde temsil edilmesine olanak sağlamıştır. Örnek bir uygulama Şekil 16'te sunulmuştur.



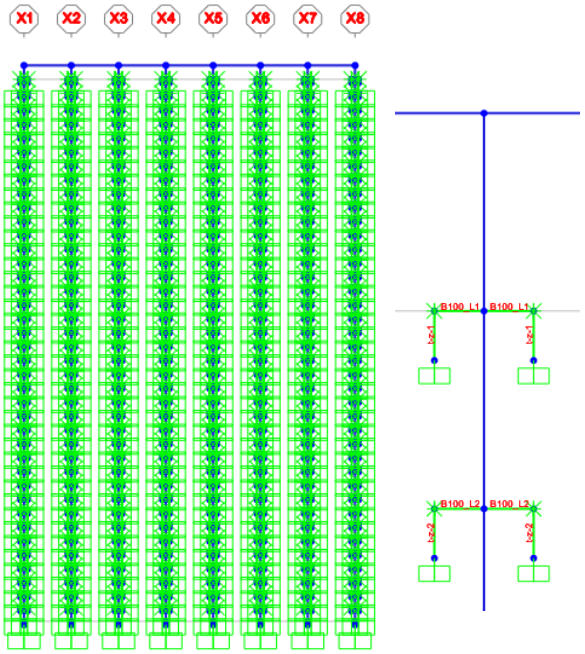
Şekil 16. ETABS ve SAP2000 analiz modelinde maksimum yer değiştirmelerin atanması.

5.1.3 Statik Artımsal Zemin Yer Değiştirme Yüklemesi İçin Yapısal Modellemenin Oluşturulması

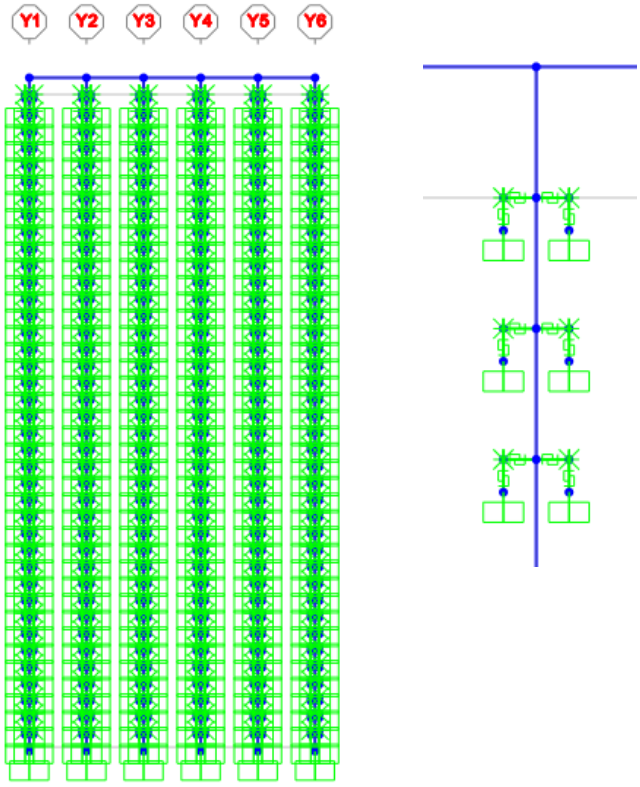
Yapı-kazık-zemin etkileşiminin modellenmesinde, doğrusal olmayan statik itme analizi ve kazık-1B zemin etkileşim yöntemi esas alınmıştır. 2B alt sistem analizi için dahil edilen eksenler, Şekil 17'da temel planında gösterilmiştir. X ve Y yönlerine ait modeller, sırasıyla Şekil 18 ve Şekil 19'de sunulmaktadır.



Şekil 17. Kazık yerleşim planında X ve Y eksenleri için analiz modeli.

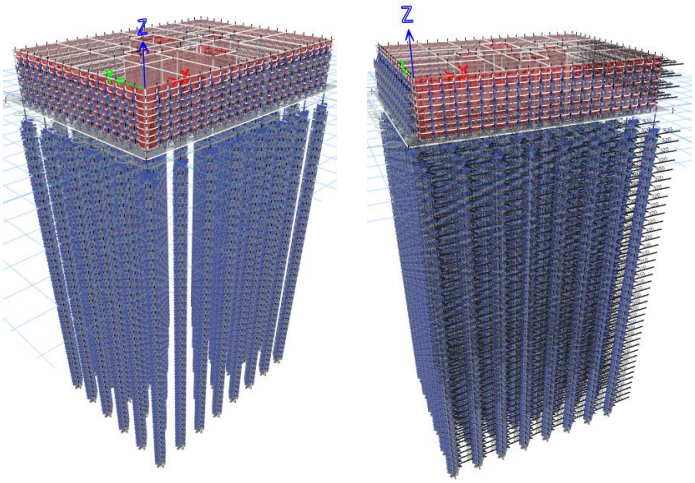


Şekil 18. X ekseni için analiz modeli.



Şekil 19. Y ekseni için analiz modeli.

3B alt sistemine ait model, Şekil 20'te gösterilmiştir.



Şekil 20. 3B alt sisteme ait model.

Kinematik etkileşim için, derinlikle değişen yer değiştirme değerleri kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Bu yer değiştirme değerleri, tüm 11x2 deprem verisi için DeepSoil yazılımı yardımıyla elde edilmiş olup, analizlerde yer değiştirme yüklemesi olarak değerlendirilmiştir. İlgili yer değiştirme değerleri Tablo 4 ve Tablo 5'te sunulmaktadır

Tablo 4. Yer Değiştirme Yüklemeleri (X Yönü)

Deprem Kaydı	Yükleme Adı	Düğüm Noktası Yük Tipi
EQ 1-1	Kum1X	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 2-1	Kum2X	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 3-1	Kum3X	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 4-1	Kum4X	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 5-1	Kum5X	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 6-1	Kum6X	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 7-1	Kum7X	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 8-1	Kum8X	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 9-1	Kum9X	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 10-1	Kum10X	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 11-1	Kum11X	Yerdeğiştirme Yüklemesi

Tablo 5. Yer Değiştirme Yüklemeleri (Y Yönü)

Deprem Kaydı	Yükleme Adı	Düğüm Noktası Yük Tipi
EQ 1-2	Kum1Y	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 2-2	Kum2Y	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 3-2	Kum3Y	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 4-2	Kum4Y	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 5-2	Kum5Y	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 6-2	Kum6Y	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 7-2	Kum7Y	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 8-2	Kum8Y	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 9-2	Kum9Y	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 10-2	Kum10Y	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 11-2	Kum11Y	Yerdeğiştirme Yüklemesi

5.1.4 Eylemsizlik Etkileşimi Analizi

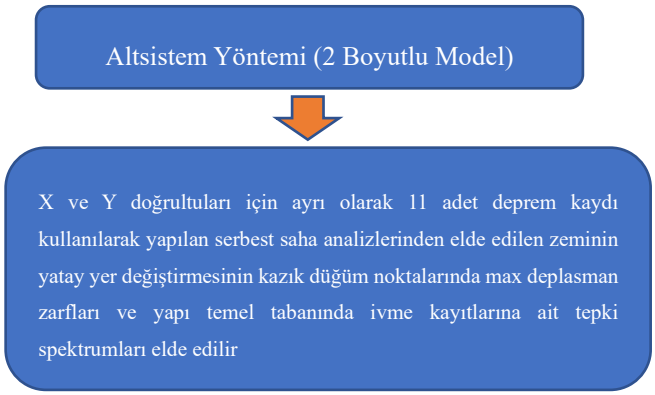
TBDY-2018 Yöntem III kapsamında, yapı-kazık-zemin etkileşimini analiz etmek için iki farklı hesap modeli kullanılmıştır. Birinci model, temel tabanında zeminle etkileşimi temsil eden yayları içeren üstyapı, bodrum ve temel sistemini kapsamaktadır. Bu modelde, temel hareketine ait ivme kayıtları uygulanmış ve kazıklarda oluşan iç kuvvetler belirlenmiştir.

Üst yapı, bodrum kat temel sisteminin bir arada bulunduğu hesap modelinde kazık tepe noktalarına noktasal olarak tanımlanan yaylar modelinde, deprem verisi olarak serbest analizi sonucunda temel tabanında elde edilen spektrumların otalaması tasarım spektrumu olarak kullanılabilir. Ancak serbest zaman analizi sonucunda elde edilen tasarım spektrumunun ordinatları TBDY 2018 2.3.4'te verilen tasarım spektrumunun ordinatlarından küçük olmaması gerekmektedir. Elverişsiz olan spektrum eylemsizlik analizinde kullanılır. İlgili modelin oluşturulma aşamaları, Şekil 21'de 2B alt sistem yaklaşımına ait akış şeması ile sıralı bir şekilde sunulmuştur.

İkinci model ise, üstyapı, bodrum, temel ve kazıkların birleşik bir sistem olarak modellenmesini içermektedir. Bu modelde, zeminin davranışı doğrusal olarak ele alınmış ve zemini temsil eden yayların başlangıç rijitlikleri sisteme dahil edilmiştir.

Üst yapı, bodrum kat temel ve kazık(kütlesiz) sisteminin bir arada bulunduğu hesap modelinde geoteknik verilere göre elde edilen non-linear p-y, t-z link elemanları kazıkların düğüm noktalarına kazık taban uç düğüm noktasına ise non-linear q-z link elemanları tanımlanır. Link elemanalar linear davranacak şekilde başlangıç rijitlikleri kullanılarak elde edilen modelde, deprem verisi olarak serbest analizi sonucunda temel tabanında elde edilen spektrumların otalaması tasarım spektrumu olarak kullanılabilir. Ancak serbest zaman analizi sonucunda elde edilen tasarım spektrumunun ordinatları TBDY 2018 2.3.4'te verilen tasarım spektrumunun ordinatlarından küçük olmaması gerekmektedir. Elverişsiz olan spektrum eylemsizlik analizinde kullanılır. Bu modelin oluşturulma aşamaları ise, Şekil 22'de 3B alt sistem yaklaşımına ait akış şeması ile açıklanmıştır.

Her iki model, kazıkların ve yapı-zemin sisteminin deprem etkileri altındaki davranışlarını değerlendirmek üzere kullanılmış ve elde edilen sonuçlar birbiriyle karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Bu karşılaştırmalar, modellerin doğruluğu ve tasarım süreçlerinde kullanılabilirliği açısından önemli çıkarımlar sunmaktadır.



Şekil 21. 2B alt sistem yaklaşım akış şeması.

Deprem etkisi altında üstyapı ve yapı temelinin bulunduğu hesap modelinde üst yapı için linear dinamik analizi yapılır. Aynı X ve Y doğrultuları için elde edilen eylemsizlik etkileşimi iç kuvvetleri le kinematik etkileşim iç kuvvetleri(moment değeri 2.5 oranında azaltılır) birleştirilir X ve Y doğrultuları TBDY 2018,16C5 uyarınca birleştirilir.

Şekil 22. 3B Alt Sistem Yaklaşım Akış Şeması

5.1.5 Kinematik Etkileşim ve Eylemsizlik Etkileşim Etkilerinin Birleştirilmesi

Yapı-kazık-zemin etkileşim analizleri sonucunda, kinematik ve eylemsizlik etkileşim analizlerinden ayrı ayrı elde edilen iç kuvvetler, TBDY 2018 Bölüm 16C.5'e uygun olarak birleştirilmelidir. Bu birleştirme sürecinde, tasarım amacıyla dikkate alınacak iç kuvvetler, birincil deprem yönünde yapılan analizden elde edilen iç kuvvetlerin, dik yönde elde edilen iç kuvvetlerin %30'u ile toplanmasıyla belirlenmelidir (TBDY 2018, Bölüm 4.4.2). İç kuvvet birleştirme tablosu Tablo 6'da sunulmaktadır.

Tablo 6. X ve Y yönleri için kinematik ve eylemsizlik etkileşim etkilerinin birleştirilmesi.

X-doğrultusu	**Y-doğrultusu**
$M_x = M_{x,kinematik} + M_{x,eylemsizlik}$	$M_y = M_{y,kinematik} + M_{y,eylemsizlik}$
$V_x = V_{x,kinematik} + V_{x,\ eylemsizlik}$	$V_y = V_{y,kinematik} + V_{y,\ eylemsizlik}$
$A_x = A_{x,kinematk} + A_{x,\ eylemsizlik}$	$A_y = A_{y,kinematik} + A_{y,\ eylemsizlik}$
X doğrulusuna göre birleşim	**Y doğrulusuna göre birleşim**
$M_{T\ X} = M_x + 0.3M_y$	$M_{T\ Y} = M_y + 0.3M_x$
$V_{T\ X} = V_x + 0.3V_y$	$V_{T\ Y} = V_y + 0.3V_x$
$A_{T\ X} = A_x + 0.3A_y$	$A_{T\ Y} = A_y + 0.3A_x$

İki boyutlu alt sistem yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilen yapı-zemin etkileşimi analizleri sonucunda, en kritik kazıkta gözlemlenen maksimum moment (M), kesme kuvveti (V) ve eksenel kuvvet (A) değerlerinin eylemsizlik etkiler tarafından baskın olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, eylemsizlik etkileşim değerlerinin maksimuma ulaştığı kazık derinliğindeki kinematik etkileşim değerleri alınarak tabloda gösterildiği şekilde birleştirilmiştir. Detaylı sonuçlar Tablo 7'da sunulmaktadır.

Tablo 7. Yapı-zemin etkileşimi analizleri sonucunda en kritik kazıkta oluşan maksimum moment (M), kesme kuvveti (V) ve eksenel kuvvet (A) değerleri. (2B alt yapı yaklaşımı).

		Azaltılmamış Analiz Sonuçları			Azaltılmış Sonuçlar(Moment katsayısı(1/2.5))		
Analiz	**Yükleme Doğrultusu**	**M (kN.m)**	**V (kN)**	**A (kN)**	**M (kN.m)**	**V (kN)**	**A (kN)**
Kinematik Etkileşim	X	204.9	55.9	3868.1	81.9	55.9	3868.1
	Y	266.3	83.3	3981.4	106.5	83.3	3981.4
Eylemsizlik Etkileşim	X	1682.7	628.8	5193.3	1682.7	628.8	5193.3
	Y	1352.1	528.0	4963.2	1352.1	528.0	4963.2
Toplam	X doğrultusu				1764.7	684.8	9061.4
	Y doğrulutsu				1458.6	611.4	8944.5
Birleştirilmiş Toplam	X doğrulutsuna göre				**2202.3**	**868.2**	**11744.8**
	Y doğrultusuna göre				1988.0	816.8	11662.9

Üç boyutlu alt sistem yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilen yapı-zemin etkileşimi analizleri sonucunda, en kritik kazıkta gözlemlenen maksimum moment (M), kesme kuvveti (V) ve eksenel kuvvet (A) değerlerinin eylemsizlik etkiler tarafından baskın olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, eylemsizlik etkileşim değerlerinin maksimuma ulaştığı kazık derinliğindeki kinematik etkileşim değerleri alınarak tabloda gösterildiği şekilde birleştirilmiştir. Detaylı sonuçlar Tablo 8'de sunulmaktadır.

Tablo 8. Yapı-zemin etkileşimi analizleri sonucunda en kritik kazıkta oluşan maksimum moment (M), kesme kuvveti (V) ve eksenel kuvvet (A) değerleri. (3B alt yapı yaklaşımı).

		Azaltılmamış Analiz Sonuçları			Azaltılmış Sonuçlar(Moment katsayısı(1/2.5))		
Analiz	**Yükleme Doğrultusu**	**M (kN.m)**	**V (kN)**	**A (kN)**	**M (kN.m)**	**V (kN)**	**A (kN)**
Kinematik Etkileşim	X	523.3	159.0	2874.0	209.3	159.0	2874.0
	Y	635.4	199.6	3178.1	254.2	199.6	3178.1
Eylemsizlik Etkileşim	X	2208.5	854.5	5716.8	2208.5	854.5	5716.8
	Y	2150.3	838.9	5716.8	2150.3	838.9	5716.8
Toplam	X doğrultusu				2417.8	1013.5	8590.7
	Y doğrulutsu				2404.5	1038.5	8894.9
Birleştirilmiş Toplam	X doğrulutsuna göre				**3139.1**	1325.1	11259.2
	Y doğrultusuna göre				3129.8	**1342.6**	**11472.1**

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, ZD tipi zemine inşa edilmesi planlanan, bodrum katlı 17 katlı bir yüksek binanın, TBDY 2018'in Bölüm 16'sında belirtilen Yöntem III kullanılarak yapılan yapı-kazık-zemin etkileşimi (SSI) analizleri gerçekleştirilmiştir.

Alt sistem yaklaşımında, binanın üstyapısı üç boyutlu olarak modellenmiştir. Analiz, üstyapı, bodrum, temel ve kazık sisteminin birlikte tek bir modelde modellenmesinin yanı sıra, üstyapı ile bodrum-temel sistemlerinin ayrı ayrı analiz edildiği senaryoları da içermektedir. Kinematik etkileşim analizleri, bodrum, temel ve kazık sisteminin 2B ve 3B

modelleri üzerinde, bodrum ve temel kütlesi dikkate alınmadan yapılmıştır. Ardından, yerel zemin davranışı analizlerinden elde edilen yer değiştirme kayıtları ve ivme spektrumları kullanılarak 11 deprem kaydı, üstyapı ve temel sistemini temsil eden modele uygulanmış ve bu yükler kazık sistemine aktarılmıştır. Elde edilen yükler, temel ve kazık sistemi modeline aktarılmış ve yapı-kazık-zemin etkileşimi analizi tamamlanmıştır.

TBDY 2018'in Bölüm 16'sında (Yöntem III) önerilen şekilde, analizler için ayrı hesaplamalı modeller oluşturulmuştur. İki yaklaşımın her biri için, kritik kazıklarda kinematik ve eylemsizlik etkileşim analizlerinde gözlemlenen maksimum etkiler Tablo 9'da sunulmuştur

Tablo 9. Farklı hesaplama modelleri kullanılarak kazıklarda oluşan iç kuvvetlerin karşılaştırılması.

Analiz Modelleri		2B Altsistem	3B Altsistem
Kinematik Etkileşim+Eylemsizlik Etkileşimi	Max Moment(kNm)	2202.2694	3129.7878
	Max Kesme Kuvveti(kN)	868.161	1342.573
	Max Eksenel Kuvveti(kN)	11662.933	11472.122

Tablo 9'da 2B alt sistem yaklaşımının, 3B alt sistem yaklaşımına kıyasla daha düşük iç kuvvetler ürettiği görülmektedir. Simetrik olarak çözümlenen modelde, 2B ve 3B analizler arasındaki etkileşim farkının bu ölçüde büyük olması beklenmemektedir. Bu farklılığın bodrum yapısından kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir.

Elde edilen bulgular, bodrum katlara sahip yüksek yapıların kazık tasarımında, ilk değerlendirme aşamalarında 2B alt sistem yaklaşımının pratik ve yararlı bir ön analiz yöntemi olabileceğini göstermektedir. Ancak sonuçlar, bodrumlu yapılarda 3B alt sistem yaklaşımının daha detaylı analizler ve kesin sonuçlar elde etmek açısından önemli olduğunu da ortaya koymaktadır. 3B modelleme, yapı-kazık-zemin etkileşimini daha kapsamlı bir şekilde değerlendirerek kazık tasarım sürecinde güvenilir sonuçlar elde edilmesine katkı sağlayabilmektedir.

Kaynaklar

[1] TBDY, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, AFAD, Türkiye, 2018.

[2] Türk Standartları. (2000). Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları. (TS500). Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

[3] Yakut, A., Binici, B., Topkaya, C., Canbay, E., Sucuoğlu, H., Tuncay, K., Yılmaz, M. T., Gülkan, P., (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği Örnekler Kitabı. Ankara.

[4] Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, PEER Strong Motion Database, http://peer.berkeley.edu/smcat/, 2006.

[5] CSI. SAP2000, V18.Integrated Software for Structural Analysis and Design. Berkeley, CA, USA: Computer and Structures Inc. (CSI), 2018

[6] ETABS Ultimate (Version 19.0.0) [Computer Software] Extended Three-Dimensional Analysis of Building System, Computers and Structures Inc., Berkeley, California.

[7] Seismomatch [Computer software]. Earthquake Software for Response Spectrum Matching,

[8] American Petroleum Institute (API), Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms–working stress design. API Recommended Practice 2A(RP-2A WSD), 20th edn, 193 pp, 1993.

[9] Reese L. C., Cox W. R., Koop F. D. (1974). Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand. 6th Offshore Technology Conferance, Houston, Texas, 1974.

[10] Reese L. C., Cox W. R., Koop F. D. (2011). Field Testing and Analysis of Laterally Loaded Piles in Stiff Clay. 7th Offshore Technology Conferance, Houston, Texas.

[11] Reese L. C., Welch R. C. (1975). Lateral Loading of Deep Foundation in Stiff Clay. Journal Of Geotechnical Engineering Division, 101, 7, 633-649.

[12] Alver, Ozan & Sezen, Atila & Eseller-Bayat, Ece. (2021). TBDY 2018'e Göre Geoteknik Tasarım: Sıvılaşma ve Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi Analizleri. Teknik Dergi. 32. 10.18400/tekderg.744891.

[13] DeepSoil (2019) "Tuttorial and User Manual", V7, Board of Trustees of University of Illinois at UrbanaChampaign and Youssef Hashash.

[14] Demir, B.-Peker, A. S.-Tomaç, S. K. (2019). P-Y Eğrileri ve TBDY 2018 Gereklilikleri: P-Y Eğrilerinin Oluşturulması. 4. Köprüler ve Viyadükler Sempozyumu, Ankara.

[15] URL-1:https://tdth.afad.gov.tr/, (Ziyaret tarihi: 25 Haziran 2024).

[16] URL-2: https://ngawest2.berkeley.edu/, (Ziyaret tarihi: 30 Temmuz 2024).

Dicle University
Journal of Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/dumf
duje.dicle.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

Dane Çapı Dağılımının CBR (%) Değerlerine Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması

Experimental Investigation of the Effect of Grain Size Distribution on CBR (%)

Murat Gülen[1*], Suat Akbulut[2], Yaşar Kayan[3]

[1] Siirt Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, murat.gulen@siirt.edu.tr
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4143-9266

[2] Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, sakbulut@yildiz.edu.tr
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5266-0543

[3]Siirt Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, yasarkayan@siirt.edu.tr
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5106-6072

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 28 Ocak 2025
Revizyon 15 Nisan 2025
Kabul 13 Mayıs 2025
Online 30 Haziran 2025

Anahtar Kelimeler:

Dane çapı dağılımı,
CBR (%),
Şişme,
Lkit limit,
Kil oranı

ÖZ

İnşaat mühendisliği uygulamalarında, farklı zemin türleri dolgu malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu malzemelerin fiziksel ve mühendislik özellikleri, kullanım amacını belirleyen başlıca parametrelerdir. Yapıların performansı ve stabilitesi, dolgu malzemesine ait tasarım parametrelerinin ve bu parametrelerin yapının hizmet süresi boyunca göstereceği değişimin doğru bir şekilde öngörülmesine bağlıdır. Bu çalışma, zeminlerin şişme miktarının, likit limitinin, ortalama dane çapının ve kil oranının California taşıma oranı (CBR %) üzerindeki etkilerini deneysel olarak ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bu kapsamda, ince daneli ve düşük plastisiteli bir kile, farklı oranlarda kum ve çakıl ilave edilerek, farklı dane çapı dağılımı ve kıvam özelliklerine sahip yedi zemin numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler, optimum su muhtevası ve maksimum birim hacim ağırlıkta sıkıştırılarak hem kuru hem de 96 saat suda bekletilerek suya doygun hale getirildikten sonra CBR deneylerine tabi tutulmuştur. Her iki koşulda elde edilen CBR (%) değerleri karşılaştırılmış ve ΔCBR (%) değişimleri hesaplanmıştır. Deneysel veriler, CBR (%) değerlerindeki değişimin şişme miktarı, likit limit, ortalama dane çapı ve kil oranına bağlı olarak farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Özellikle şişme miktarına bağlı olarak CBR (%) değerlerinde %25 ile %63 arasında azalma gözlemlenmiştir. Bu bulgular, zeminlerin şişme potansiyelinin CBR (%) üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 28 January 2025
Received in revised form 15 April 2025
Accepted 13 May 2025
Available online 30 Haziran 2025

Keywords:

Grain size distribution
CBR (%)
Swelling
Liquid limit
Clay content

DOI: 10.24012/dumf.1628662

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

Various types of soil are widely used as fill materials in civil engineering applications. The physical and engineering properties of these materials are the primary parameters that determine their suitability for specific purposes. The performance and stability of structures depend largely on the design parameters of the fill material and the accurate prediction of how these parameters may change over the life of the structure. This study aims to experimentally investigate the effects of swelling potential, liquid limit, mean grain size and clay content of soils on the California bearing ratio (CBR %). For this purpose, seven different soil samples were prepared by adding different proportions of sand and gravel to a fine-grained, low plasticity kaolinite clay, resulting in soils with different grain size distributions and consistency properties. The samples were compacted to their optimum moisture content and maximum dry unit weight and then subjected to CBR tests under both dry and water-saturated conditions (after 96 hours of soaking). The CBR (%) values obtained from both conditions were compared and the ΔCBR (%) changes were calculated. The experimental findings showed that the change in CBR (%) values was significantly influenced by the swelling amount, liquid limit, mean grain size, and clay content. In particular, swelling caused a decrease in CBR (%) values ranging from 25% to 63%. These results indicate that the swelling potential of soils has a significant effect on their CBR (%) performance.

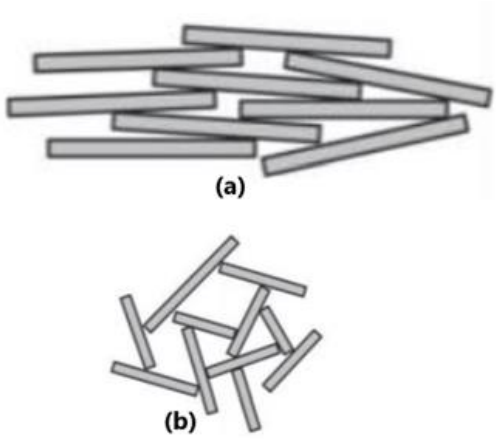
Giriş

Farklı mühendislik yapıları üzerinde inşa edildikleri zeminlerin özelliklerinden etkilenir [1], [2]. Dolgu malzemesi olarak kullanılan zeminler amaca uygun olarak farklı özelliklere ve düşük maliyetli olduğundan yol altyapı dolgusunda, baraj kil çekirdeklerinde, katı atık depolarında vb. uygulamalarda tercih edilmektedir. Bu tür yapıların stabilitesini sağlamak ve hizmet ömürleri boyunca yapısal hasarı minimize etmek için zemin özelliklerinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi gerekir [3]-[7]. Zeminlerin kullanım amacına uygun olup olmadığına karar vermek için fiziksel, kimyasal, mineralojik ve mekanik özellikleri dikkate alınır [8]-[13]. Amaca uygun zeminlerin kullanımı oturmaları, hacimsel değişimleri, taşıma kapasitesi kaybını ve stabilite sorunlarını önemli miktarda azaltır [14]. Özellikle dolgu malzemesi olarak kullanılan zeminlerin dane çapı dağılımı ve şişme özelliğine sahip ince dane oranı önemlidir [15]-[17]. Su ile temas ettiklerinde hacimlerinde artış gözlenen zeminler, şişen killer olarak tanımlanmaktadır. Bu hacim değişimi üstteki hafif yapılara ve kazı destek sistemlerine zarar vererek maddi kayıplara neden olur. Bu tür zeminler dünyanın farklı bölgelerinde olsa da yoğunlukla ABD, Çin, Hindistan, Güney Afrika, Türkiye, Avustralya vb. ülkelerde sıklıkla görülür [18]-[21]. Jones ve Holtz [22], ABD'de yaptıkları bir çalışmada şişen zeminlerin farklı mühendislik yapılarında yılda $9x10^9$ dolar maddi kayıplara neden olduğunu rapor etmiştir.

Plakalı bir yapıya sahip olan killerin özellikleri, bu plakalı yapının genişlik, uzunluk ve kalınlıklarına göre farklılık göstermektedir. Özellikle killerin toplam yüzey alanı, killerin davranışını belirleyen en önemli parametrelerden biridir. Bu zeminlerin su ile etkileşimi ve suyu yüzeylerinde tutma potansiyeli, hacminin artmasına neden olur. Bu durum şişme olarak adlandırılır. Kilin mineral yapısı, su muhtevası, plakalı yapının dizilimi ve boyutları şişme davranışına etki eden ana faktörlerdendir [23]. Killer genellikle kaolin, illit ve smektit grubu killer olmak üzere üç ana grupta incelenir [24], [25]. Bu gruplandırmada, şişme potansiyeli en düşük olan ve diğer iki gruba oranla daha kararlı bir davranış gösteren killer kaolin grubu killeri oluştururken; en kararsız kil grubu ise smektit grubu killerdir [23], [26]. Buna ek olarak killer şişme potansiyellerine göre likit limiti (LL%) < 50 olanlar az şişen killer, 50 < LL(%) < 60 olanlar orta şişen killer ve LL(%)> 60 olan killer yüksek şişen killer olarak adlandırılır [27].

Farklı araştırmacılar, killerdeki şişme miktarlarının LL(%), plastik limit (PL), plastisite indisi (PI), kil oranı (KO), katyon değişim kapasitesine ve başlangıç su muhtevasına bağlı olarak hesaplanabileceğini gösteren farklı ampirik eşitlikler önermişlerdir [28]-[31].

Özellikle şişme davranışı gösteren killerin yatay tabakalanma yapısı (flokül yapı) bozulur ve dağınık bir yapı (dispersed) ortaya çıkar. Bu durum kilin hacminde bir artışa neden olur. Hacminde meydana gelen bu artış, zemin iskelet yapısını bozarak zeminlerin fiziksel ve mühendislik özellikleri önemli derece değiştirir (Şekil 1).



Şekil 1. Killerin dizilimi ve yapısı a) tabakalı b) dağınık [35]

İçerisinde belirli bir oranda şişen kil içeren zeminlerin geçirgenliği, mukavemeti ve sıkışabilirliği şişme davranışından önemli derece etkilenir [32]-[34]. Gülen vd. [36], farklı dane çapı dağılımlarına ve farklı oranlarda kil içeren 12 zemin numunesinin CBR(%) değerini belirlemişlerdir. Bu çalışmalarda zeminlerdeki şişme miktarının LL (%) artışı ile arttığını; ortalama dane çapı (D_{50}) artışına bağlı olarak azaldığını ifade edilmiştir. Yıldırım [23], kıvam limitleri ve dane çapı dağılımlarını dikkate alarak regresyon analizi ile CBR(%) değerini hesaplanabilirliğini araştırmıştır. Optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde hazırlanan numuneler için CBR(%) değerleri korelasyon katsayı (R^2) 0.95 doğrulukta tahmin edilmiştir. Şeker [37], CBR(%) değerinin zemin özelliklerine bağlı olduğunu ifade ederek farklı dane çapı dağılımlarının CBR(%) değerine etkisini incelemiştir. Dane boyutunun ve kuru birim hacim ağılık değerinin artışı CBR(%) değerlerinin artmasına neden olurken, su muhtevasındaki artış CBR(%) değerinin azalmasına neden olduğu rapor edilmiştir. Taşkıran [38], ince taneli zeminlerin CBR(%) değerini etkileyen parametreleri yapay sinir ağlarını kullanarak araştırmıştır. Çalışmalarında, CBR(%) değerlerini etkileyen en önemli parametrenin zeminin kuru birim hacim ağırlığı olduğunu ifade etmiştir. Ayrıca plastisite indisi, optimum su muhtevası ve iri dane oranının da CBR(%) değerini etkiyen diğer parametreler olduğunu belirtmiştir. Ramasubbarao ve Sivasankar [39], CBR(%) değerlerine etki eden parametreleri regresyon analizleri ile incelemişlerdir. Analizler sonucunda CBR(%) değerini etkileyen en önemli parametrenin kuru birim hacim ağırlık olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca plastik limit, likit limit, ince dane oranı ve optimum su muhtevasının da CBR(%) değerlerini etkileyen diğer parametreler olduğunu belirtmişlerdir.

Bu çalışma, şişme davranışı ile bazı indeks özelliklerinin CBR(%) üzerindeki etkisini belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda, ince daneli ve düşük plastisiteli kaolin grubu bir kile, farklı oranlarda kum ve çakıl ilave edilerek, farklı dane çapı dağılımlarına sahip yedi zemin numunesi hazırlanmıştır. Kuru ve suya doygun olarak hazırlanan bu numuneler CBR deneylerine tabi tutulmuş ve CBR(%) değerleri belirlenmiştir. Elde edilen deneysel veriler doğrultusunda, şişme miktarının, D_{50}'nin ve LL(%)'nin ΔCBR(%) değerlerine etkisi araştırılmıştır.

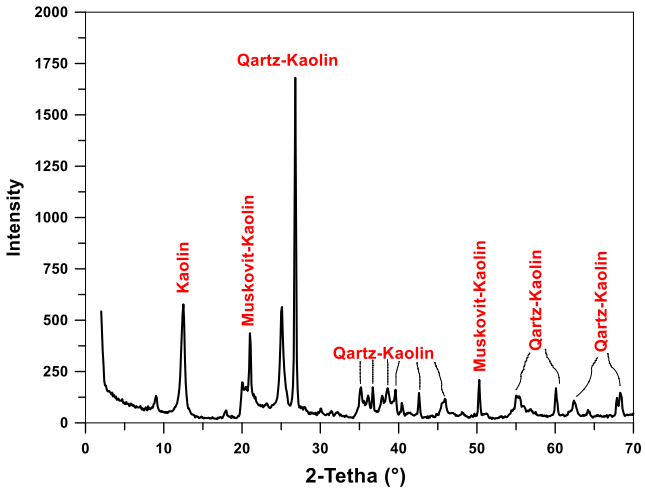
Deneysel Çalışmalar

Zeminlerin fiziksel özellikleri

Bu çalışmada kapsamında ince daneli, kohezyonlu ve düşük plastisiteli bir kile farklı oranlarda kum ve çakıl eklenerek farklı dane çapı dağılımlarına sahip yedi farklı zemin numunesi elde edilmiştir. Bu zeminlerin isimlendirilmesinde, kil oranı en yüksek ve %100 ince daneli olan numune S1 olarak adlandırılmıştır. Kile farklı oranlarda iri daneli malzeme eklenmesiyle ince dane oranı kademeli olarak azaltılarak elde edilen diğer karışımlar ise sırasıyla S2, S3, S4, S5, S6 ve S7 şeklinde tanımlanmıştır. Bu zeminlerin dane çapı dağılımını belirlemek için özgül ağırlık (Gs), hidrometre, elek analizi; kıvam limitlerini belirlemek için LL(%) ve plastik limit (PL); optimum su muhtevası (w_{opt}) ve maksimum birim hacim ağırlık (γ_{kmax}) değerlerini belirlemek için modifiye kompaksiyon deneyleri Yıldız Teknik Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir (Şekil 2).

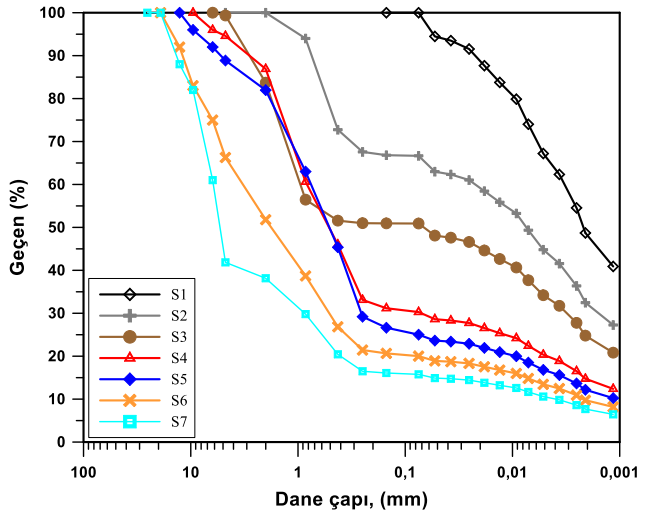
Şekil 2. Deneysel çalışmalara ait görseller

Ayrıca kilin kimyasal yapısını belirlemek için X-ışını kırınımı (X-ray Diffraction, XRD) analizi yaptırılmış ve sonuçları Şekil 3'te sunulmuştur.



Şekil 3. X-ışını kırınımı analiz sonucu

Modifiye kompaksiyon ve CBR deneyleri için sıkıştırma aşamaları ASTM D698 uygun olarak kaksimum dane çapı 19,1 mm dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında kullanılan zeminlere ait dane çapı dağılımları Şekil 4'te; ilgili standartlarla belirlenen fiziksel özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne (USCS) göre söz konusu zeminlerden S1, S2 ve S3 CL; S4, S5 ve S6 SC ve S7 ise GC zemin sınıfında yer almaktadır. Amerikan Eyalet Karayolu ve Ulaştırma Yetkilileri Birliği (AASHTO) sınıflandırmasına göre ise S1, S2 ve S3 A-6; S4, S5 ve S6 A-2-6 ve S7 A-2-4 sınıfında değerlendirilmektedir.



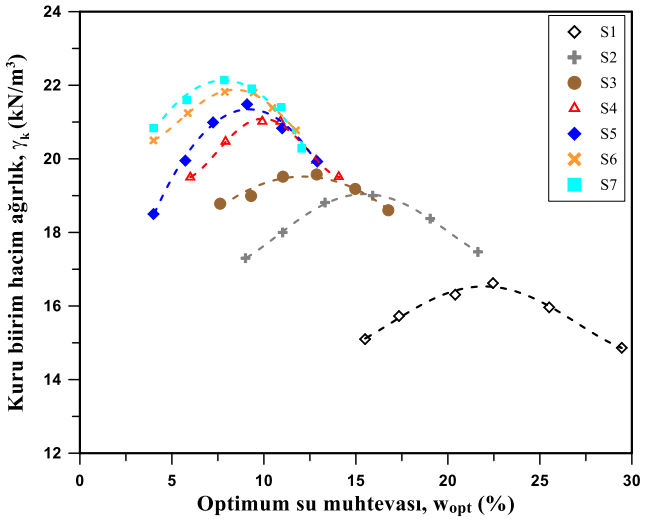
Şekil 4. Zeminler için dane çapı dağılımları

Tablo 1. Zeminlerin fiziksel özellikleri

Özellikler	Numuneler						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Özgül ağırlık, Gs	2,65	2,72	2,75	2,76	2,78	2,78	2,79
D_{50} (mm)	0,002	0,007	0,06	0,50	0,50	1,70	5,20
Çakıl oranı, (%)	-	-	-	5,5	11,1	33,7	58,2
Kum oranı, (%)	-	33,40	49,10	64,20	63,9	46,3	25,8
Silt oranı, (%)	51,00	34,60	26,90	16,30	13,0	10,5	8,0

Kil oranı, (%)	49,00	32,00	24,00	14,00	12,0	9,5	7,0
LL(%)	40,00	37,00	34,70	30,50	28,5	27,5	25,0
PL(%)	25,00	23,00	21,20	17,50	16,5	16,0	15,0
PI(%)	15,00	14,00	13,50	13,00	12,00	11,50	10
Zemin sınıfı (USCS)	CL	CL	CL	SC	SC	SC	GC
Zemin sınıfı (AASHTO)	A-6	A-6	A-6	A-2-6	A-2-6	A-2-6	A-2-4

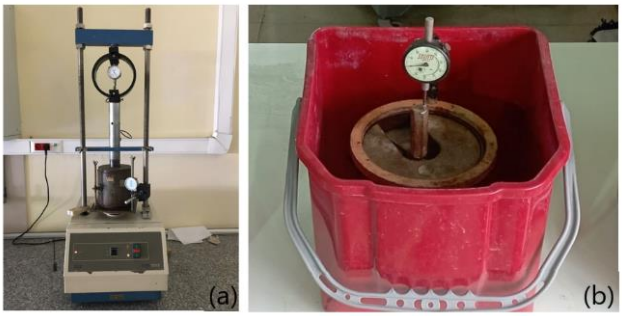
Maksimum dane çapı 19,1 mm'den küçük olan zeminler için gerçekleştirilen modifiye Proctor deneyine ait kompaksiyon eğrileri Şekil 5'te sunulmuştur. Zeminlerin dane çapı dağılımları ve D_{50} değerleri dikkate alındığında, kil ve silt oranındaki artış ile kum ve çakıl oranındaki azalma, optimum su muhtevası ile kuru birim hacim ağırlık üzerinde belirgin etkiler meydana getirdiği açıkça görülmektedir. Dane boyutu küçüldükçe, spesifik yüzey alanındaki artış ve ince daneli zeminlerin su tutma kapasitesinin yükselmesi, optimum su muhtevasının artmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte,



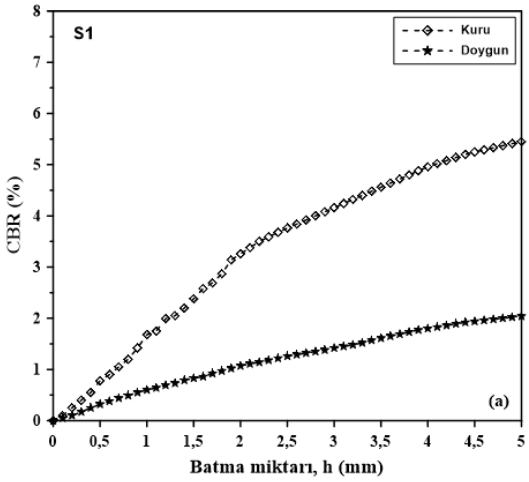
Şekil 5. Zeminler için modifiye kompaksiyon eğrileri

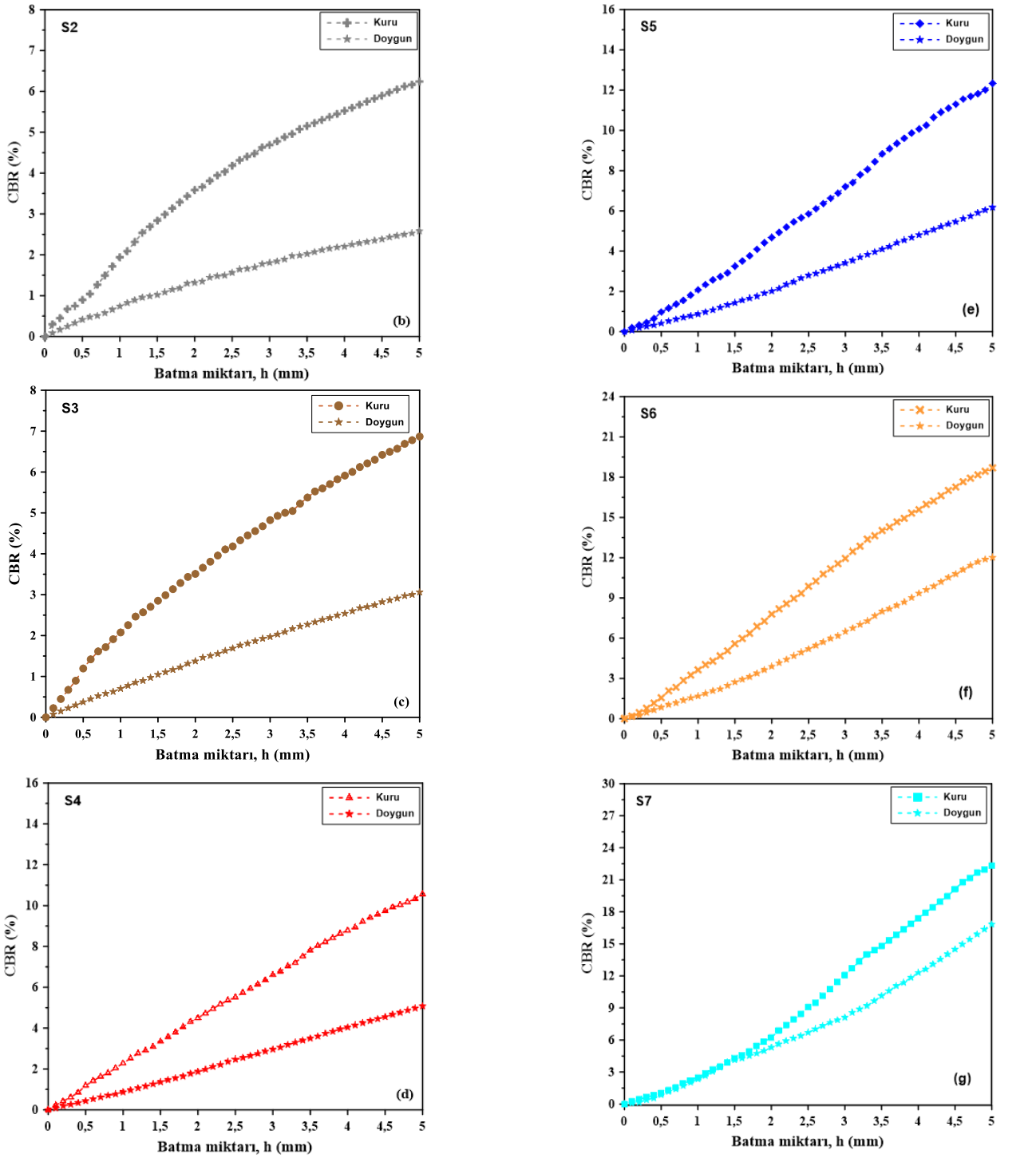
CBR deneyleri için Şekil 5'teki optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri dikkate alınarak hazırlanmıştır. CBR kalıbında sıkıştırılan numuneler 4,5 kg'lık bir yük altında 96 saat suda bekletilmeden eksenel yüklemeye tabi tutulmuştur (Şekil 6a). Bu deneylerden elde edilen CBR(%) değerleri kuru durum olarak ifade edilmiştir. Aynı deney prosedüründe optimum su muhtevasında ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında hazırlanan numuneler ASTM D1883-21'e göre 4,5 kg'lık bir yük altında 96 saat boyunca su içerisinde bekletilerek meydana gelen oturma ve şişme miktarları ölçülmüştür (6b). Suya doygun mumeneler bu süre sonunda sudan çıkartılarak eksenel yüklemeye tabi tutulmuştur. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen yük-batma eğrileri dikkate alınarak CBR (%) değerleri hesaplanmıştır. Her bir numune, hem üst hem de alt yüzeylerinden eksenel yüklemeye tabi tutulmuş ve bu yüzeylere ait yük-batma eğrileri elde edilmiştir. Hesaplamalar sonucunda, alt yüzeye ait CBR (%) değerlerinin genellikle üst yüzeye göre yaklaşık %20 daha büyük olduğu belirlenmiştir. Bu farklılık, 96 saat suda dane boyutunun küçülmesi boşluk oranını artırmakta ve bu durum, kuru birim hacim ağırlığın azalmasına yol açmaktadır. Ancak kum ve çakıl oranı yüksek olan S5, S6 ve S7 numunelerine, ağırlıkça %15–25 oranında ince daneli zemin ilave edilmesi, boşluk hacmini minimize ederek daha etkin bir sıkışma sağlamıştır. Bu durum, kuru birim hacim ağırlığın artmasına neden olmuştur. Dolayısıyla, ince ve iri taneli zeminlerin dengeli oranlarda karıştırılması, sıkışabilirlik ve mühendislik özellikleri üzerinde olumlu etkiler yaratabilmektedir.

bekletilen numunelerde alt yüzeyin şişme yönünden kısıtlanması nedeniyle, bu bölgede meydana gelen şişme kaynaklı zemin yapısındaki değişimlerinin üst yüzeye kıyasla daha sınırlı olmasından kaynaklanmaktadır. Her bir numuneye ait nihai CBR (%) değeri ise, alt ve üst yüzeylerden elde edilen CBR değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak belirlenmiştir. Bu yaklaşım, yükleme koşullarındaki olası asimetrileri dengeleyerek daha güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 6. CBR deneylerine ait detaylar a) eksenel yükleme b) suya doyurma aşaması





Şekil 7. CBR(%) sonuçları a)S1 b)S2 c)S3 d)S4 e)S5 f)S6 g)S7

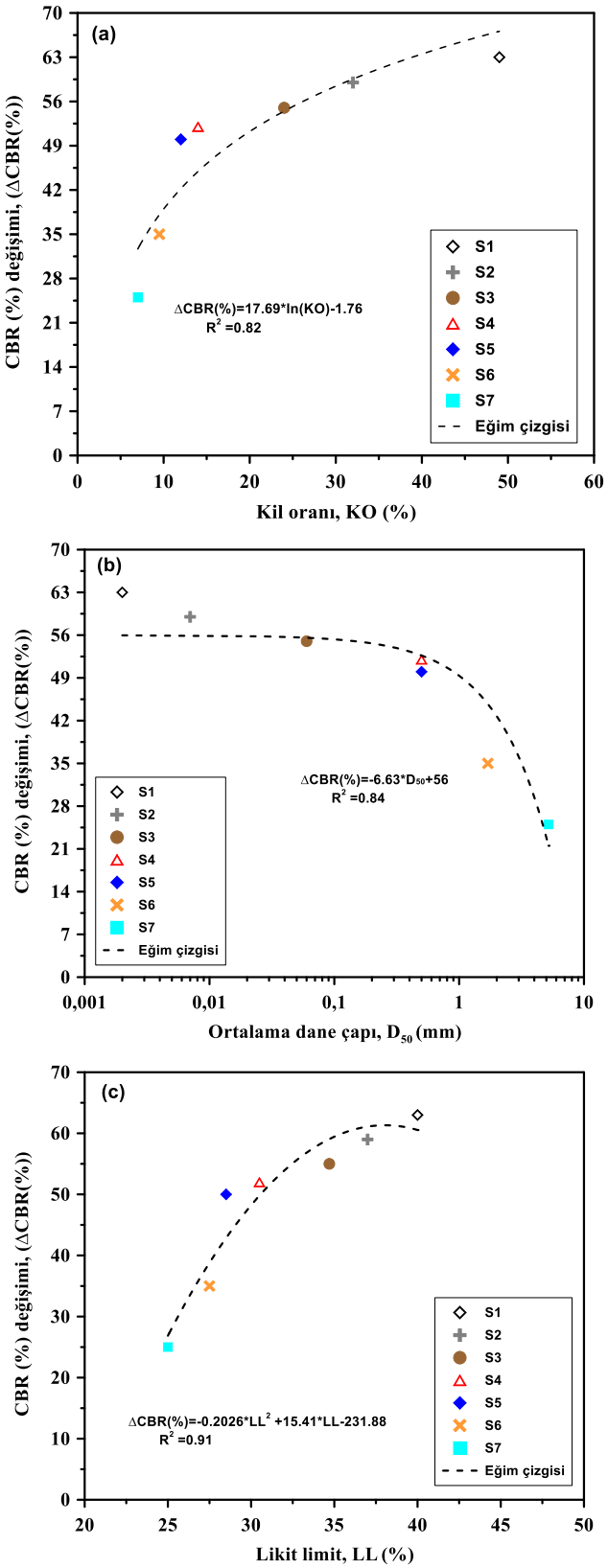
Bulgular ve Tartışma

Zeminlerin CBR(%) değerlerini etkileyen fiziksel ve indeks özellikler üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Gülen vd. [36], farklı dane çapı dağılımlarına ve mineralojik bileşimlere sahip zeminlerde donma-çözülme etkisinin CBR değerlerine etkisini araştırarak, bu değişkenlerin zemin davranışında önemli rol oynadığını göstermiştir. Şeker [37], indeks özelliklerin CBR(%) değerine etkisini ampirik modellerle değerlendirmiş ve LL (%), PI(%) gibi özelliklerin anlamlı sonuçlar verdiğini ifade etmiştir. Taşkıran [38] ile Ramasubbarao ve Sivasankar [39] yapay zeka ve regresyon modelleri kullanarak CBR(%) değerlerinin tahminine odaklanmıştır. Ancak bu çalışmaların önemli bir kısmı, şişme potansiyeline sahip zeminlerin CBR (%) değerleri üzerindeki etkisini doğrudan incelememiş; zeminlerin şişme davranışı ile taşıma kapasitesi arasında kurulabilecek nedensel ilişkilere yeterince odaklanmamış ya da bu etkileşimi yalnızca dolaylı parametreler üzerinden değerlendirmekle sınırlı kalmıştır.

Dane çapı dağılımının ve LL(%)'nin ΔCBR(%) değişimine etkisi

Zeminlerin dane çapı dağılımı ve LL(%) değerleri, ΔCBR (%) üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Granüler zemin oranı yüksek ve düşük LL(%) değerlerine sahip zeminlerde, suya duyarlılığın azalması CBR(%) değerlerinin artmasını sağlamaktadır. Buna karşılık, kil oranı ve LL(%) değeri yüksek olan zeminlerde, su ile etkileşim sonucunda ortaya çıkan şişme davranışı, zemin yapısının bozulmasına ve dolayısıyla dayanım kaybına neden olmaktadır.

Suya doygun zeminlerin yaş CBR(%) değerleri, zeminin taşıma gücünün en düşük olduğu durumu ifade eder ve tasarımlarda güvenli tarafta kalabilmek için bu değer dikkate alınır [40]. Aynı şartlarda hazırlanan numuneler kuru ve suya doygun su muhtevalarında CBR deneylerine tabi tutulmuştur. Bu numuneler için hesaplanan CBR(%) değerleri arasında ciddi farklılıklar gözlemlenmiştir. Şekil 8'de her bir numune için kuru ve doygun durum için hesaplanan CBR(%) değerlerindeki değişim (ΔCBR) KO, D_{50} ve LL (%)'ye bağlı olarak sunulmuştur. Veriler incelendiğinde maksimum azalma kil oranı en yüksek olan S1 numunesinde %63; minimum azalma ise kil oranı en düşük olan S7 numunesinde %25'tir. ΔCBR(%) değerlerindeki %25–%63 aralığındaki değişim, Microsoft Excel yazılımı kullanılarak lineer, logaritmik, üssel ve polinomsal tekli regresyon analizleri ile incelenmiş ve en yüksek determinasyon katsayısını (R^2) sağlayan regresyon denklemi ise ilgili şekil üzerinde sunulmuştur. Buna ek olarak çoklu regression analizleri ile CBR (%) değişiminin KO(%), D_{50} ve LL(%)'ye bağlı değişimi hesaplanmış ve Eşitlik 1'de ifade edilmiştir. Bu analizde R^2 değeri 0.95 olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar literatürde bu konuda yapılan çalışmalarla uyumludur [37]-[39].



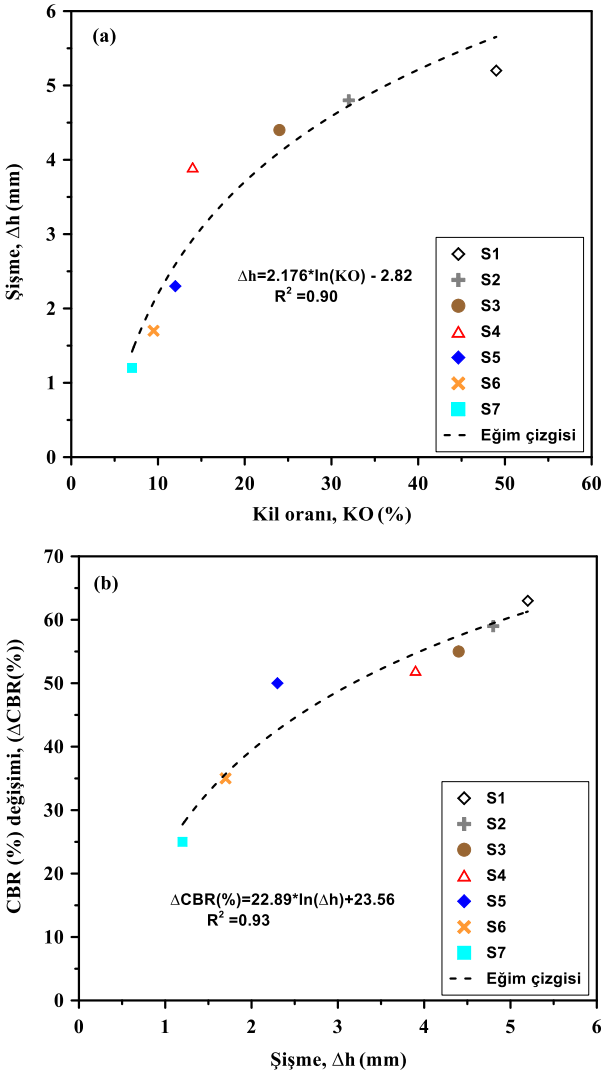
Şekil 8. ΔCBR(%) değişimi a) ΔCBR (%) ve KO(%) b) ΔCBR(%) ve D_{50} c) ΔCBR(%) ve LL(%)

$$\Delta CBR\ (\%) = -4{,}22D_{50} + 0.0065KO(\%) + 0{,}987LL(\%) + 20{,}36 \quad \textbf{(1)}$$

Şişmenin ΔCBR(%) değişimine etkisi

Killi zeminlerde kil minarellerinin su ile etkileşimi sonucu maydana gelen şişme, zeminin hacmini artırarak iskelet yapısını bozar ve taşıma gücünü düşürür. Bu durum, özellikle dolgu malzemelerinde stabilite kaybına ve düşük CBR(%) değerlerine neden olur. Literatür çalışmaları incelendiğinde zeminlerin şişme potansiyellerinin LL(%) ve PI(%) bağlı olarak rapor edilmiştir [28], [41], [42]. 96 saat suda bekletilerek suya doygun duruma gelen numunelerde meydana gelen şişme davranışı zeminin iskelet yapısını bozar. Sıkıştırma aşamasında belirli bir dane dizilimine kavuşan danelerin yerleşim düzeni bozulur. Bu durum zeminin mukavemetini önemli bir miktarda değiştirir. ΔCBR(%) değişimlerinin temel nedeni de meydana gelen bu şişme miktarlarıdır [36]. Şekil 9a'da şişmenin kil oranı bağlı değişimi; Şekil 9b'de ΔCBR(%)'deki azalmanın 96 saat sonundaki toplam şişmelere bağlı değişimi sunulmuştur.

CBR(%) değerleri dikkate alınarak dolgu amacıyla tercih edilebilecek zemin türlerinin kullanım alanlarına ilişkin özet bilgiler Tablo 2'de sunulmuştur. Nihai durumda deneysel çalışmalardan belirlenen CBR(%) değerlerinin literatür çalışmaları ile uyumlu olduğu görülmektedir. S1, S2 ve S3 numunelerinin kuru CBR(%) değerleri sırasıyla 5,45; 6,24 ve 6,87 olup, bu zeminler zayıf-orta düzeyde dolgu malzemesi olarak sınıflandırılmaktadır. Aynı numunelerin yaş CBR(%) değerleri 2,04; 2,57 ve 3,06 olup, çok zayıf nitelikte dolgu malzemesi sınıfında yer almaktadır. Benzer şekilde, S4 ve S5 numunelerinin kuru CBR değerleri 10,56 ve 12,00 ile orta sınıf dolgu malzemesi olarak değerlendirilirken; yaş CBR değerleri 5,06 ve 6,00 olup zayıf-orta sınıf olarak kabul edilmektedir. S6 numunesi, kuru CBR değeri 18,48 ve yaş CBR değeri 11,88 ile her iki durumda da orta sınıfta yer alırken; S7 numunesi, yaş CBR değeri 16,36 ile orta ve kuru CBR değeri 21,94 ile iyi sınıf dolgu malzemesi olarak sınıflandırılmaktadır [43], [44], [45].



Şekil 9. Şişme ve ΔCBR(%) değerlerinin değişimi a) kil oranı ve şişme b) şişme ve ΔCBR(%)

Karayolları Teknik Şartnamesi (2020)'ne göre CBR(%) değeri 8'in altında olan zeminler, temel ve alt temel tabakalarında kullanıma uygun değildir. Karayolları yapım işlerinde LL(%) ≤60, PI(%) ≤35, standart Proctor deneyinden belirlenen γ_{kmax} ≥1, 45 t/m^3 ve şişmesi (%) ≤3 olan zeminlerin dolgu malzemesi olarak kullanılabilir olduğunu rapor etmektedir. Buna ek olarak bir karayolu üst yapısı farklı tabakalardan meydana gelir. Bu tabakaların her birinde tercih edilecek dolgu malzemelerinin farklı LL(%), PI (%) ve dane çağı dağılımlarına sahip olması gerekir [40].

Tablo 2. Temel, alt temel ve alt dolgu malzemesi olarak zeminlerin değerlendirilmesi [43]

CBR(%)	Değerlendirme	Kullanım	Sınıflandırma Sistemi	
			USCS	AASHTO
0-3	Çok kötü	Alt temel	OH, CH, MH, OL	A-5, *A-6*, A-7
3-7	Zayıf-orta	Alt temel	OH, CH, MH, OL	A-4, A-5, A-6, A-7
7-20	Orta	Alt temel	OL, ML, *CL, SC*, SM, SP	A-2, A-4, A-6, A-7
20-50	İyi	Temel, alt temel	GM, *GC,* SW, SM, SP, GP	A1b, A-2-5, A-3, *A-2-6*
>50	Mükemmel	Temel	GW-GM	A1a, *A-2-4*, A-3

Sonuçlar ve Öneriler

Mekanik enerji uygulanarak sıkıştırılan zeminlerin iskelet yapısındaki küçük değişimler zeminin mukavemeti önemli derece etkiler. Bu çalışma kapsamında zemindeki şişmelerin CBR(%) değerlerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bu çalışmada dikkate alınan zemin özellikleri için elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1) *Şişme davranışı*, zeminlerin taşıma kapasitesini doğrudan etkilemekte olup, suya doygunluk sonrası CBR(%) değerlerinde %25 ila %63 arasında azalma gözlemlenmiştir. Bu azalma, özellikle tamamı ince daneli olan ve kil oranı en yüksek numune olan S1'de maksimum düzeyde gerçekleşirken; kil oranı ve likit limit değeri en düşük olan S7 numunesinde minimum seviyede kalmıştır.
2) Su ile etkileşim sonucunda şişme eğilimi gösteren killi zeminlerin hacimlerinde artış meydana gelmekte, bu da zemin iskelet yapısının bozulmasına ve mukavemetin ciddi ölçüde azalmasına neden olmaktadır. Bu durum, mühendislik yapılarında kullanılan dolgu malzemeleri açısından kritik bir tasarım parametresi olarak değerlendirilmelidir.
3) Yapılan regresyon analizlerine göre, şişme miktarı ile ΔCBR(%) değişimi arasında yüksek düzeyde korelasyon (R^2 = 0,95) tespit edilmiştir. Bu ilişki, likit limit, kil oranı ve ortalama dane çapının CBR(%) üzerinde ne derece etkili olduğunu ortaya koymaktadır.
4) D_{50} değerinin artması, zeminlerin şişme potansiyelini azaltmakta ve CBR(%) üzerindeki negatif etkileri sınırlamaktadır. Bu bağlamda, şişmeye bağlı taşıma gücü kayıplarını minimize için kil oranı ve likit limit değeri düşük, D_{50} değeri ise yüksek zeminlerin tercih edilmesi önerilmektedir.
5) Bu bulgular, CBR deneylerinin suya doygun koşullarda ve şişmenin artık stabil olduğu durumda gerçekleştirilmesi gerektiğini ve dolgu malzemesi seçiminde şişme potansiyelinin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.
6) Literatür çalışmaları incelendiğinde, yeterli veriye sahip çalışmalarda yapay zekâ, derin öğrenme algoritmaları ve Python, MATLAB, SPSS gibi yazılımlar kullanılarak yüksek doğrulukta modellemelerin gerçekleştirildiği görülmektedir. Ancak mevcut çalışmada veri sayısının az olması, analizlerin Microsoft Excel regresyon analizleri ile sınırlandırılmasına neden olmuştur. Veri setinin genişletilmesi, daha kapsamlı analizlerin yapılmasına olanak sağlayarak daha güvenilir ve genellenebilir sonuçların elde edilmesini sağlayacaktır.

Yazar katkıları

Yazar[1]: Çalışma konsepti, deneysel çalışmalar, taslağın oluşturulması, verilerin analizi ve yorumlanmasında görev almıştır.

Yazar[2]: Çalışma konsepti, literatür çalışması, verilerin analizi ve yorumlanmasında görev almıştır.

Yazar[3]: Literatür çalışması, verilerin analizi ve yorumlanmasında görev almıştır.

Teşekkür

Deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesinde sağladığı katkılardan dolayı İnşaat Mühendisi Vedat Karakoç'a teşekkür ederiz.

Kısaltma ve Semboller

CBR(%) : California taşıma oranı

D_{50}: Ortalama dane çapı

Gs: Özgül ağırlık

PL(%): Plastik limit

PI(%): Plastisite limit

LL(%): Likit limit

KO: Kil oranı

XRD: X-ışını kırınımı (X-ray Diffraction)

w(%) : Su muhtevası

γ: Birim hacim ağırlık

USCS: Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi

AASHTO: Amerikan Karayolu ve Ulaştırma Birliği

Kaynakça

[1] S. Roy and S. K. Bhalla, "Role of geotechnical properties of soil on civil engineering structures," Resour. Environ., vol. 7, no. 4, pp. 103–109, 2017, doi: 10.5923/j.re.20170704.03

[2] A. Laskar and S. K. Pal, "Geotechnical characteristics of two different soils and their mixture and relationships between parameters," Electron. J. Geotech. Eng., vol. 17, pp. 2821–2832, 2012 .

[3] B. Bui, J.-C. Morel, V.-H. Tran, S. Hans, and M. Oggero, "How to use in-situ soils as building materials," Procedia Eng., vol. 145, pp. 1119–1126, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.04.145

[4] A. E. Oghenero, E. G. Akpokodje, and A. C. Tse, "Geotechnical properties of subsurface soils in Warri, Western Niger Delta, Nigeria," J. Earth Sci. Geotech. Eng., vol. 4, no. 1, pp. 89–102, 2014.

[5] P. O. Youdeowei and H. O. Nwankwoala, "Suitability of soils as bearing media at a freshwater swamp terrain in the Niger Delta," J. Geol. Min. Res., vol. 5, no. 3, pp. 58–64, 2013, doi: 10.5897/JGMR11.046.

[6] Y. Z. Beju and J. N. Mandal, "Experimental investigation of shear strength behaviors of stone dust–EPS geofoam interface," J. Hazard. Toxic Radioact. Waste, vol. 22, no. 4, p. 04018033, 2018, doi: 10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.000042.

[7] D. S. Al-Abri and Y. E. A. Mohamedzein, "Performance of plastic pipes installed in dune sand," in Proc. Pipelines 2010: Climbing New Peaks to Infrastructure Reliability—Renew, Rehab, and Reinvest, pp. 410–421, 2010, doi: 10.1061/41138(386)40.

[8] B. Dereli, "Konsol istinat duvarlarında geri dolgu malzemesi olarak Bitlis pomza agregalı köpük betonların kullanılabilirliğinin araştırılması," Ph.D. dissertation, Süleyman Demirel Univ., 2024.

[9] I. W. Croudace and R. G. Rothwell, Micro-XRF studies of sediment cores. Springer, 2015, doi: 10.1007/978-94-017-9849-5.

[10] I. Gratchev, Rock mechanics through project-based learning. CRC Press/Balkema, 2020, doi: 10.1201/9780429278839.

[11] B. Baradan, İnşaat mühendisleri için malzeme bilgisi, vol. 307. DEÜ Yayınları, 2020.

[12] G. Vallejo and M. Ferrer, Mühendislik jeolojisi, K. Kayabalı, Trans. Ankara Üniversitesi Yayınları, 2014.

[13] J. M. Gere and B. J. Goodno, Mechanics of materials. Cengage Learning, 2012.

[14] R. D. Holtz, W. D. Kovacs, and T. C. Sheahan, An introduction to geotechnical engineering. Pearson Educ., 2023.

[15] E. Balaban, A. Šmejda, and M. İ. Onur, "Farklı dolgu malzemesine sahip donatılı istinad duvarlarının performanslarının değerlendirilmesi," Resilience, pp. 117–128, 2020, doi: 10.32569/resilience.632301.

[16] M. Riccio, M. Ehrlich, and D. Dias, "Field monitoring and analyses of the response of a block-faced geogrid wall using fine-grained tropical soils," Geotext. Geomembr., vol. 42, no. 2, pp. 127–138, 2014, doi: 10.1016/j.geotexmem.2014.01.006.

[17] G. Yang, H. Liu, P. Lv, and B. Zhang, "Geogrid-reinforced lime-treated cohesive soil retaining wall: Case study and implications," Geotext. Geomembr., vol. 35, pp. 112–118, 2012, doi: 10.1016/j.geotexmem.2012.09.001.

[18] F. H. Chen, Foundations on expansive soils. Elsevier Sci. Publ., 1988.

[19] W. S. Abdullah, K. A. Alshhibli, and M. S. Al-Zou'bi, "Influence of pore water chemistry on the swelling behaviour of compacted clays," Appl. Clay Sci., vol. 15, pp. 447–462, 1999, doi: 10.1016/S0169-1317(99)00034-4.

[20] J. C. Parker, D. F. Amos, and D. L. Kaster, "An evaluation of several methods of estimating soil volume change," Soil Sci. Soc. Am. J., vol. 41, no. 6, pp. 1059–1064, 1977, doi: 10.2136/sssaj1977.03615995004100060008x.

[21] Y. J. Du, S. L. Li, and S. Hayashi, "Swelling–shrinkage properties and soil improvement of compacted expansive soil, Ning-Liang Highway, China," Eng. Geol., vol. 53, pp. 351–358, 1999, doi: 10.1016/S0013-7952(98)00086-6.

[22] D. G. Fredlund, "The prediction and performance of structures on expansive soils," in Proc. Int. Symp. on Prediction and Performance in Geotechnical Engineering, Calgary, pp. 51–60, Jun. 1987.

[23] B. Yıldırım, "Kaliforniya taşıma oranının (CBR) regresyon analizleri ve yapay sinir ağları ile belirlenmesi," M.S. thesis, Niğde Univ., Inst. Sci. Tech., 2009.

[24] R. E. Grim, "Physico-chemical properties of soils: Clay minerals," J. Soil Mech. Found. Div., vol. 85, no. 2, pp. 1–17, 1959.

[25] F. Civan, Reservoir formation damage: Fundamentals, modeling, assessment, and mitigation. Gulf Prof. Publ., 2023.

[26] A. T. Sudjianto, K. B. Suryolelono, A. Rifa'i, and I. B. Mochtar, "The effect of water content change and variation suction in behavior swelling of expansive soil," Int. J. Civil Environ. Eng. IJCEE-IJENS, vol. 11, no. 3, pp. 11–17, 2011.

[27] Z. Kaya, "Kil zeminlerin şişme karakteristiklerinin belirlenmesi," M.S. thesis, İTÜ, Inst. Sci. Tech., 1997.

[28] H. B. Seed, R. J. Woodward, and R. Lundgren, "Prediction of swelling potential for compacted clays," J. Soil Mech. Found. Div., vol. 88, no. 3, pp. 53–87, 1962, doi: 10.1061/JSFEAQ.0000431.

[29] D. E. McCormack and L. P. Wilding, "Soil properties influencing swelling in Canfield and Geeburg soils," Soil Sci. Soc. Am. Proc., vol. 39, pp. 496–502, 1975, doi: 10.2136/sssaj1975.03615995003900030034x.

[30] W. R. Gill and C. A. Reaves, "Relationships of Atterberg limits and cation-exchange capacity to some physical properties of soil," Soil Sci. Soc. Am. Proc., vol. 21, pp. 491–494, 1957.

[31] T. W. Lambe and R. V. Whitman, Soil mechanics. John Wiley & Sons, 1969.

[32] B. Adeleke, J. Kinuthia, and J. Oti, "Strength and swell performance of high-sulphate kaolinite clay soil," Sustainability, vol. 12, no. 23, p. 10164, 2020, doi: 10.3390/su122310164.

[33] I. Aksu, E. Bazilevskaya, and Z. T. Karpyn, "Swelling of clay minerals in unconsolidated porous media and its impact on permeability," GeoResJ, vol. 7, pp. 1–13, 2015, doi: 10.1016/j.grj.2015.02.003.

[34] A. A. Sabtan, "Geotechnical properties of expansive clay shale in Tabuk, Saudi Arabia," J. Asian Earth Sci., vol. 25, no. 5, pp. 747–757, 2005, doi: 10.1016/j.jseaes.2004.07.003.

[35] F. Wagner, "Mechanical properties of clays and clay minerals," in Dev. Clay Sci., 2013, doi: 10.1016/B978-0-08-098258-8.00011-0.

[36] M. Gülen, A. Aslan Fidan, A. S. Köşeli, and H. Kılıç, "Effect of freeze-thaw on CBR in soils with different gradation and mineralogy," Turk. J. Civ. Eng., vol. 35, no. 4, 2024, doi: 10.18400/tjce.1349440.

[37] V. Şeker, "Sıkıştırılmış zeminlerin Kaliforniya taşıma oranının (CBR) basit indeks özellikler kullanarak tahmin edilmesi," M.S. thesis, Van Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018.

[38] T. Taskiran, "Prediction of California Bearing Ratio (CBR) of fine-grained soils by AI methods," Adv. Eng. Softw., vol. 41, pp. 886–892, 2010, doi: 10.1016/j.advengsoft.2010.01.003.

[39] G. V. Ramasubbarao and Sivasankar, "Predicting soaked CBR value of fine-grained soils using index and compaction characteristics," Jordan J. Civ. Eng., vol. 3, pp. 354–360, 2013.

[40] Karayolları Genel Müdürlüğü, Karayolu teknik şartnamesi (Yol altyapısı, sanat yapıları, köprü ve tüneller, üstyapı ve çeşitli işler). Ankara: KGM, 2020. [Online]. Available: https://www.kgm.gov.tr

[41] W. G. Holtz and H. J. Gibbs, "Engineering properties of expansive clays," Trans. Am. Soc. Civ. Eng., vol. 121, no. 1, pp. 641–663, 1956, doi: 10.1061/TACEAT.0007325.

[42] R. B. Peck, W. E. Hanson, and T. H. Thornburn, Foundation engineering. New York: John Wiley and Sons, 1974.

[43] K. Hazirbaba and H. Gullu, "California bearing ratio improvement and freeze–thaw performance of fine-grained soils treated with geofiber and synthetic fluid," Cold Reg. Sci. Technol., vol. 63, no. 1–2, pp. 50–60, 2010, doi: 10.1016/j.coldregions.2010.05.006.

[44] E. Mina, R. Kusuma, and N. Ulfah, "Utilization of steel slag and fly ash in soil stabilization and their effect on California bearing ratio (CBR) value: Case study: Kp. Kadusentar road Medong village Mekarjaya subdistrict Pandeglang district," IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., vol. 673, p. 012034, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/673/1/012034.

[45] J. E. Bowles, Engineering properties of soils and their measurement, 4th ed. New York: McGraw-Hill, 1992.

Dicle University
Journal of Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/dumf
duje.dicle.edu.tr

Araştırma Makalesi/ Research Article

Hurma çekirdeği tozunun bitümlü bağlayıcıların ortalama karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları üzerindeki etkisinin belirlenmesi

Determination of the effect of palm kernel powder on the average mixing and compaction temperatures of bituminous binders

Ceren Beyza İnce[1*]

[1]Malatya Turgut Özal Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ceren.ince@ozal.edu.tr
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6385-0964

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 5 Mart 2025
Revizyon 6 Nisan 2025
Kabul 7 Haziran 2025
Online 30 Haziran 2025

Anahtar Kelimeler:

Bitüm, hurma çekirdeği, tarımsal artık, modifiye bitüm, konvensiyonel özellik, viskozite

ÖZ

Çalışmada, tarımsal bir artık olan hurma çekirdeği tozunun bitümlü bağlayıcıların konvensiyonel ve işlenebilirlik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda, B 50/70 saf bağlayıcı içerisine ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında hurma çekirdeği tozu (HÇT) eklenerek modifiye bağlayıcılar hazırlanmıştır. Konvensiyonel özellikleri tespit etmek için tüm bağlayıcılar yumuşama noktası, penetrasyon, düktilite ve dönel ince film etüvü (RTFO) testine maruz bırakılmıştır. İşlenebilirlik özelliğini tespit edebilmek için ise bağlayıcılar üzerinde dönel viskozimetre (RV) testi uygulanmıştır. Ayrıca, HÇT'nin bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılığı üzerindeki etkisini belirleyebilmek için ise penetrasyon indeksi (PI) değerleri hesaplanmıştır. Testler sonucunda, HÇT katkısıyla bağlayıcıların sertliğinin ve PI değerlerinin giderek artış gösterdiği, uzama kabiliyetinin ise azalmaya başladığı görülmüştür. Bununla birlikte, HÇT katkı oranı arttıkça bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının da giderek artış gösterdiği görülmüştür. Sonuç olarak, bir tarımsal artık olan hurma çekirdeği tozunun bitümlü bağlayıcıların karakteristik özelliklerini geliştirmede olumlu bir etkisi olduğu görülmüştür.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 5 March 2025
Received in revised form 6 April 2025
Accepted 7 June 2025
Available online 30 June 2025

Keywords:

Bitumen, date kernel, agricultural residue, modified bitumen, conventional property, viscosity

DOI: 10.24012/dumf.1651872

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

In this study, the effect of date kernel powder, an agricultural residue, on the conventional and workability properties of bituminous binders were investigated. For this purpose, modified binders were prepared by adding date kernel powder (DKP) to B 50/70 pure binder at the rates of 5%, 10%, 15% and 20% by weight. All binders were subjected to softening point, penetration, ductility and rotational thin film oven (RTFO) tests to determine the conventional properties. Rotational viscometer (RV) test was applied on the binders to determine the workability properties. In addition, penetration index (PI) values were calculated to determine the effect of DKP on the heat sensitivity of the binders. As a result of the tests, it was observed that the hardness and PI values of the binders gradually increased with the addition of DKP, and the elongation ability began to decrease. However, it was observed that the mixing and compaction temperatures of the binders gradually increased as the DKP addition rate increased. As a result, it was observed that date kernel powder, an agricultural residue, has a positive effect in improving the characteristic properties of bituminous binders.

Giriş

Geleneksel bitüm ile inşa edilen yol kaplamaları çeşitli hava ve çevre koşulları sebebiyle zaman içerisinde bozularak deforme olmaktadır. Kaplamalarda en sık görülen deformeler ayrışmalar, tekerlek izleri ve çatlaklardır. Deformeler, yalnızca yol güvenliği ve uzun ömürlülüğünün önüne geçtiği gibi aynı zamanda bakım ve onarım maliyetlerini de arttırmaktadır. Tüm bu olumsuz durumlara karşı yol mühendisleri kaplamanın kullanım ömrünü uzatmak ve performansını arttırmak için çeşitli katkı malzemeleri kullanarak bitümün özelliklerini geliştirmeye çalışmaktadır [1–6].

Üstün yol kaplama malzemelerine olan ihtiyacı karşılayabilmek için araştırmacılar, ticari malzemelerden (stiren-bütadien-stiren (SBS) başta olmak üzere, fiberler vs.) kompozit malzemelere hatta atık ve artık malzemelere (PET, PE, PVC gibi plastik kökenli atıklar başta olmak üzere çeşitli tarımsal, ormansal ve evsel artıklar vs.) kadar birçok malzemeyi bitüm yada sıcak karışım (bitüm+agrega) içerisinde kullanmış ve böylece bağlayıcıların özellikleri geliştirilmeye çalışılmıştır. Ancak son yıllarda, birçok araştırmacının da ifade ettiği gibi, malzemede ucuz ve kolay temin edilebilirlik durumu göz önünde bulundurduğunda atık/artık malzemeler daha çok katkı malzemesi olarak çalışmalarda kullanılmaktadır [7–18].

Atıklar, günümüzde birçok alanda oluşan, canlı ve çevre sağlığı üzerinde olumsuz etkileri olan atıl durumdaki malzemelerdir. Bu malzemelerin önemli bir kısmı geri dönüşüme tabi tutulabiliyorken bir kısmı ise atıl durumda birikerek ekolojik sistem üzerinde olumsuz durumlara sebep olmaktadır. Artıklar ise, belirli bir üretim sonucunda ortaya çıkan ve tekrar kullanılabilen yan ürünlerdir [19]. Atık ve artık denilince ilk akla gelen endüstriyel (cüruflar, madeni yağlar vb.) ve evsel artıklar (pet şişe, poşet, çöp vb.) olsa da tarım alanında da birçok artık malzeme oluşmaktadır [20–24]. Özellikle zeytin ve ayçiçeği başta olmak üzere pamuk, şeker pancarı ve tütün hasadı sonucunda da büyük miktarlarda artık malzemeler açığa çıkmaktadır [25–29].

Bu çalışmada, tarımsal bir artık olan hurma çekirdeğinin bitümlü bağlayıcıların karakteristik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Hurma, yeryüzünde tarım kültürünün ilk dönemlerinde yetiştirilen ve "antik ürün" olarak da anılan Hurma ağacının meyvesidir. İlk olarak eski Mezopotamya bölgesinde ve batı Hindistan bölgesinde yetiştirilen hurma ağacı, günümüzde ise Orta Doğu, Kuzey Afrika ve Orta Amerika'da yetiştirilmektedir. Genellikle sıcak iklime sahip bölgelerde yetiştirilen hurma ağacının dünya çapında yaklaşık 100 farklı çeşidi bulunmaktadır. Dünya üzerinde hurma üretiminde Suudi Arabistan, Birleşik Arap Emirlikleri (BAE), Bahreyn, İran, Irak, Umman, Kuveyt, Pakistan, Yemen ve Türkmenistan ilk sırada yer alırken (yaklaşık 60 milyon ton); Afrika, Cezayir, Mısır, Fas, Moritanya, Libya, Mali, Nijer, Sudan, Çad, Tunus ve Somali 32 milyon ton üretimle ikinci sırada yer almaktadır. ABD ve Meksika'da yıllık 600.000 ton, İspanya 320.000 ton ve Avustralya da 30.000 ton hurma üretilmektedir. BAE, yıllık yaklaşık 1.5 milyon ton hurma üreten dünyanın en büyük doku kültürü laboratuvarına sahip tek ülkedir [30].

Hurma, kısa sürede tüketilebildiği için yenilenebilir enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir. Hurmanın ekiminden hemen sonra meyve verebilmesi için 4 ila 8 yıl, ticari olarak hasat edilebilmesi için ise 7 ila 10 yıl geçmesi gerekmektedir. Tipik bir hurma ağacı yılda 20 kilogram kadar kuru yaprak üretirken, hurma çekirdekleri hurma meyvelerinin neredeyse %10'unu oluşturmaktadır [31,32]. Yapılan çalışmalarda, Irak ve Mısır gibi ülkelerde hurma atıklarının küçük bir kısmı hayvan yemi olarak kullanıldığı ancak geri kalan kısmının ise atıl olarak biriktirildiği belirtilmiştir. Başka bir çalışmada, Suudi Arabistan'ın tek başına her yıl 200.000 tondan fazla hurma ağacı atığı ürettiği bildirilmiştir [33]. Yıldız ve Sohrabi ise, hurma atıklarının (ağaç kalıntıları ve çekirdekleri) genellikle çiftliklerde yakma işlemine tabi tutulduğunu, hurma üreten ülkelerde ise bu atıkların çöplüklerde biriktirilerek büyük çevre kirliliklerine sebep olduğunu belirtmiştir [30].

Genel olarak tarımsal artıkların karayolu mühendisliğinde kullanıldığı çalışmalar incelendiğinde, pamuk, ayçiçeği ve zeytin kalıntılarının bitüm veya sıcak karışımın özelliklerini geliştirmede kullanıldığı görülmüştür [33–38]. Hurma çekirdeği ile yapılan çalışmalara bakıldığında, doğrudan hurma çekirdeğinin bitüm veya sıcak karışım içerisinde kullanıldığı çalışmanın hiç olmadığı, hurma çekirdeğinin yakılarak kül haline getirildiği çalışmaların ise oldukça az olduğu görülmüştür [31,39,40]. Bunlardan Mirhosseini ve arkadaşlarının (2016) yapmış oldukları çalışmada, hurma çekirdeği külü kullanılarak hazırlanan sıcak karışımların nem hasarı direnci araştırılmış ve çalışma sonucunda hurma çekirdeği külü katkılı karışımların nem hasarına karşı dirençlerinin oldukça yükseldiği ifade edilmiştir [31]. Başka bir çalışmada, hurma çekirdeği külü kullanımının bitüm ve sıcak karışımların yorulma davranışı üzerindeki etkisi de araştırılmış, sonuçlar hurma çekirdeği külünün hem bitüm hem de sıcak karışımın yorulma davranışını iyileştirdiği ifade edilmiştir [39].

Bu çalışmada ise, tarımsal bir artık olan hurma çekirdeği katkısının (HÇT) bitümlü bağlayıcıların konvensiyonel ve işlenebilirlik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bunun için, ilk olarak HÇT'ye ait çeşitli özellikler belirlenmiş ve ardından modifiye bağlayıcılar hazırlanarak bu bağlayıcılar üzerinde yumuşama noktası, düktilite, penetrasyon ve kısa süreli yaşlanma testleri uygulanmıştır. Ardından, tüm bağlayıcıların viskozite değerleri belirlenerek ortalama işlenebilirlik sıcaklıkları tespit edilmiştir.

Malzemeler ve yöntem

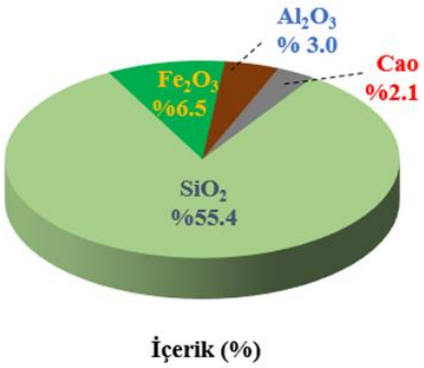
Malzemeler

Çalışmada, katkı malzemesi olarak hurma çekirdeği tozu, bağlayıcı olarak B 50/70 saf bitümü kullanılmıştır. Hurma çekirdeği tozu (Şekil 1), atıl durumdaki hurma meyvesine ait çekirdeklerin önce kurutulup ardından öğütücü yardımıyla toz (No:200 elek altı) formuna getirilmesiyle elde edilmiştir. Hurma çekirdeği tozuna (HÇT) ait özellikler Tablo 1'de, çekirdeğe ait kimyasal içerik sonuçları Şekil 2'de verilmiştir.

Şekil 1. Hurma çekirdeği tozu (HÇT).

Tablo 1. HÇT'nin özellikleri.

Özellik	HÇT
Koku	Kokusuz
Form	Pudra
Renk	Sarımtırak
Suda çözünme	Çözünmez
Yapı	Lifli



Şekil 2. Hurma çekirdeğinin kimyasal içeriği.

B 50/70 sınıfı bitüm Kırıkkale TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilmiştir. Bitüme ait geleneksel test sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Bağlayıcıya ait özellikler.

Özellik	Standart	Sonuç
Penetrasyon (0.1 mm)	TS EN 1426	62
Yumuşama noktası (°C)	TS EN 1427	49
Parlama noktası (°C)	TS EN 22592	322
Düktilite (cm)	TS EN 13589	151
Özgül ağırlık (gr/cm^3)	TS 1087	1.021

Yöntem

Çalışmada, saf bağlayıcının özelliklerini iyileştirmek amacıyla bağlayıcıya çeşitli oranlarda (%5, %10, %15 ve %20) ilave edilen HÇT malzemesi, aşağıdaki işlem adımları takip edilerek bağlayıcıya eklenmiştir. Tüm oranlar için aynı işlem adımları uygulanmış olup sonuçta HÇT katkılı bağlayıcılar elde edilmiştir.

1. İlk olarak saf bağlayıcı, yaklaşık 155 ºC sıcaklıkta akışkan hale gelinceye kadar ısıtılmıştır.
2. Isıtılan saf bağlayıcı içerisine, bitüm ağırlığının %5, %10, %15 ve %20 oranlarında HÇT ilave edilmiş ve 160 ºC sıcaklıkta sıcak sabit tutularak 90 dk boyunca 1900 rpm hızında karıştırma işlemi yapılmıştır.
3. Karıştırma işlemi bitince her bir numune saklama kaplarına alınarak kodlanmıştır.

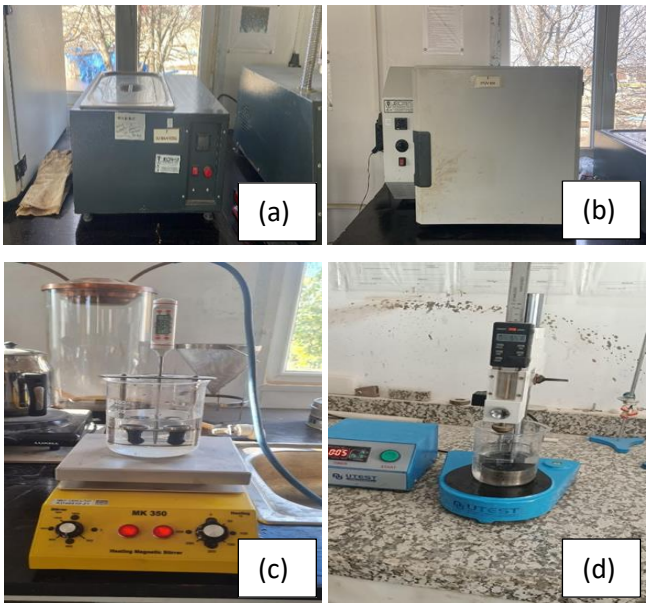
Çalışma boyunca, katkısız ve HÇT katkılı bağlayıcılar katkı artış oranı sırasına göre 0-HÇT,5-HÇT, 10-HÇT, 15-HÇT ve 20-HÇT olarak kodlanmıştır.

Test prosedürü

Çalışmada, HÇT ilaveli bağlayıcıların karakteristik özelliklerini belirleyebilmek ve saf bağlayıcı ile kıyaslayabilmek amacıyla hem saf hem de HÇT ilaveli bağlayıcılar yumuşama noktası, penetrasyon, düktilite, dönel ince film etüvü (RTFO) ve dönel viskozimetre (RV) testlerine tabi tutulmuştur. Ayrıca bağlayıcıların sıcaklığa karşı hassasiyetlerinin bir ölçüsü olarak bilinen penetrasyon indeksi (PI) değerleri de hesaplanmıştır.

Konvensiyonel (Geleneksel) testler

HÇT katkılı bağlayıcıların, yüksek sıcaklıklar altındaki direncini belirleyebilmek amacıyla bağlayıcılar TS EN 1427 standardına göre yumuşama noktası testine, HÇT katkısının bağlayıcıların sertliği ya da kıvamı üzerindeki etkisini belirleyebilmek amacıyla bağlayıcılar TS EN 1426 standardına göre penetrasyon testine tabi tutulmuştur. Ayrıca, bağlayıcıların uzama yeteneği TS EN 13589 standardına göre düktilite testi ile belirlenmiştir. Ek olarak, bağlayıcıların üzerinde kısa süreli yaşlanmanın etkisini belirleyebilmek için tüm bağlayıcılar ASTM D2872 standardına göre dönel ince film etüvü (RTFO) testine maruz bırakılmıştır [41-44]. Numunelerin hazırlanmasında kullanılan su banyosu ve etüv ile testlerde kullanılan yumuşama noktası ve penetrasyon cihazları Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Su banyosu (a), etüv (b), yumuşama noktası (c) ve penetrasyon (d) cihazları.

Konvensiyonel özellikleri belirlenen saf ve HÇT katkılı bağlayıcıların, ısıya karşı duyarlılıklarının bir ölçüsü olarak bilinen penetrasyon indeksi (PI) değerleri de denklem 1 kullanılarak belirlenmiştir.

$$PI = \frac{1952 - 500 \text{ x } \log(Pen_{25}) - 20 \text{ x SP}}{50 \text{ x } \log(Pen_{25}) - \text{SP} - 120} \quad (1)$$

Burada, bağlayıcıların oda sıcaklığındaki penetrasyon değerini "Pen_{25}", bağlayıcıların yumuşama değerini ise "*SP*" sembolize etmektedir. PI değerinin artış göstermesi, bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılığının azaldığını ve sertliğinin (kıvamının) arttığını göstermektedir [31].

RV testi

HÇT katkılı bağlayıcıların plentte karıştırma ve yolda sıkıştırma esnasındaki karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları ASTM D4402 [45] standardına göre RV testi ile tayin edilmiştir. Testte, bağlayıcıların 135 ºC ve 165 ºC'deki viskozite değerleri tespit edilerek viskozite- sıcaklık grafiği çizilmektedir ve buradan karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını belirleyebilmek için 170±20 ve 280±30 cP viskozite sınırlarına karşılık gelen sıcaklık aralıklarının kullanılmaktadır [46].

Bulgular

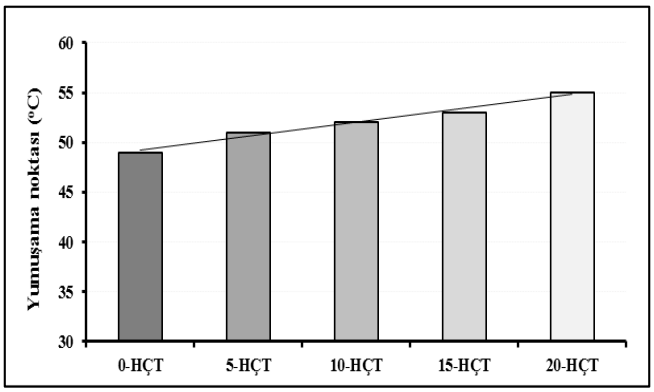
Yapılan çalışmada, HÇT katkılı bağlayıcıların konvensiyonel özellikleri yumuşama noktası, penetrasyon, düktilite ve RTFO testleri ile, karıştırma-sıkıştırma sıcaklıkları ise RV testi ile belirlenmiştir. Ek olarak, bağlayıcılara ait PI değerleri de belirlenerek tüm sonuçlar Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Saf ve modifiye bağlayıcılara ait deney sonuçları.

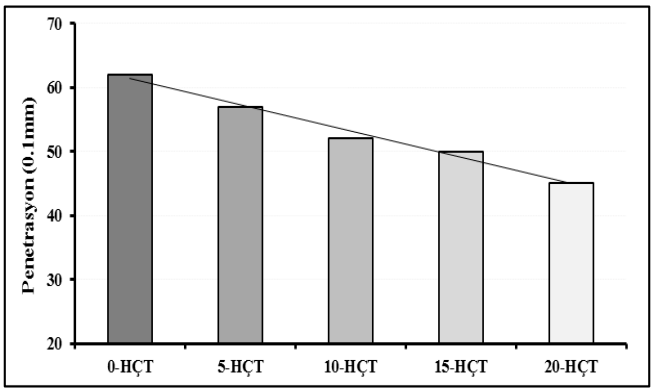
Deney	0-HÇT	5-HÇT	10-HÇT	15-HÇT	20-HÇT
Yumuşama noktası (°C)	49	51	52	53	55
Penetrasyon (mm^{-1})	62	57	52	50	45
PI	-0.95	-0.65	-0.63	-0.48	-0.28
Düktilite (cm)	151	140	135	128	105
Kütle kaybı (%)	0.32	0.27	0.25	0.21	0.13
Viskozite (135ºC) (cP)	623.8	650	715.5	744.1	810.6
Viskozite (165ºC) (cP)	177.6	185.4	228.2	190.4	215.4
Ort. karıştırma sıcaklığı (°C)	166.7	167.4	172.35	167.50	171.20
Ort. sıkıştırma sıcaklığı (°C)	153.65	155.5	159.75	157.35	158.65

Tüm bağlayıcıların konvensiyonel ve işlenebilirlik özelliklerinin HÇT artış miktarına göre değişimi sırasıyla Şekil 4-8'de verilmiştir.

Yumuşama noktası değerlerine bakıldığında (Şekil 4), HÇT katkısı ile, yumuşama değerlerinde artışlar meydana geldiği ve en yüksek artışın %12.2 oranıyla %20 HÇT katkılı bağlayıcılarda olduğu görülmektedir. Bu sonuçla beraber, penetrasyon değerleri de (Şekil 5) yumuşama deney sonuçları ile uyumluluk göstererek HÇT katkısı ile azalmaya başlamış ve en fazla azalmanın yine %20 HÇT oranında %27.4 kadar olduğu görülmüştür.

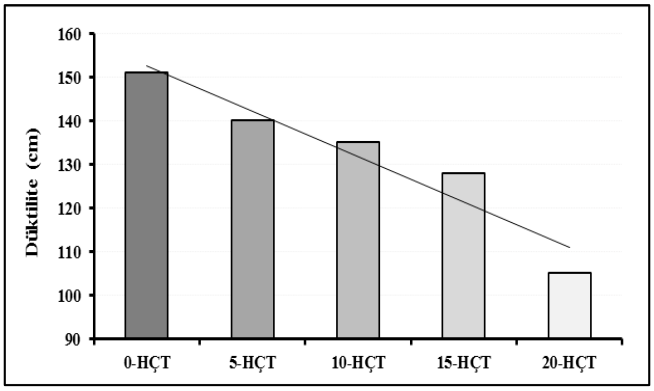


Şekil 4. HÇT içeriğine göre yumuşama noktası değişimi.



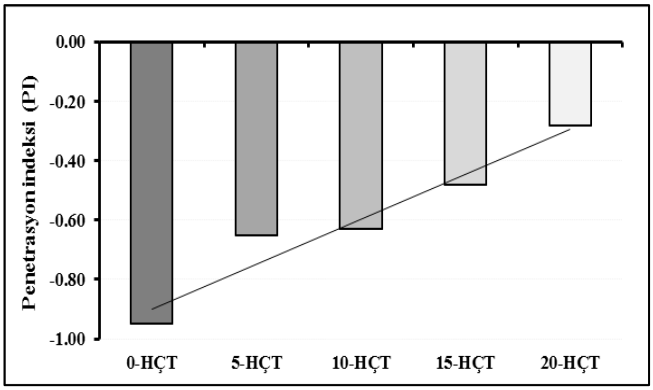
Şekil 5. HÇT içeriğine göre penetrasyon değişimi.

Bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, HÇT katkısı ile bağlayıcıların sertliğinin giderek arttığını (penetrasyon değerlerinin azaldığı) ve bu sebeple yumuşama değerlerinin arttığı ifade edilebilir. Ayrıca, HÇT katkılı bağlayıcıların oldukça yüksek sıcaklığa sahip bölgelerde kullanılabileceğini söylemek mümkündür.



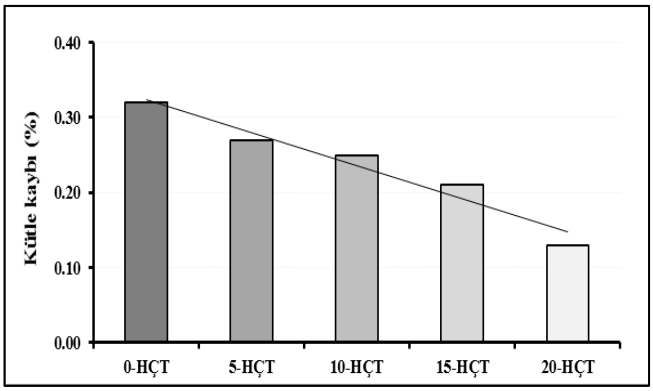
Şekil 6. HÇT içeriğine göre düktilite değişimi.

Düktilite değerlerine bakıldığında, HÇT katkısı ile bu değerlerin oldukça azaldığı ve en çok azalmanın %20 HÇT oranında %30.5 kadar elde edildiği görülmektedir. Şekil 6 değerlendirildiği zaman, HÇT katkısının bağlayıcıların uzama kabiliyetlerini azalttığı, ancak elde edilen değerlerin Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ)'ne göre [47] 100cm den az olmaması sebebiyle bu durum olumsuz değerlendirilmemektedir.



Şekil 7. HÇT içeriğine göre PI değişimi.

B 50/70 sınıfı saf bağlayıcıya HÇT eklenmesiyle bağlayıcıların PI değerlerinin giderek artış gösterdiği Şekil 7'de görülmektedir. PI değerinin yükselmesi, bağlayıcının ısıya karşı duyarlılığının azaldığını göstermektedir. Bu durumda, HÇT katkısı ile bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılıklarının azaldığı yani bağlayıcıların sertleştiği ifade edilebilir.



Şekil 8. Bağlayıcıların kütle kaybı değişimleri.

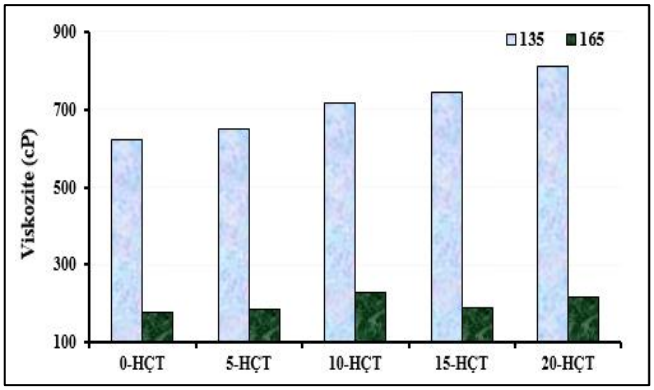
Şekil 8'e bakıldığında, HÇT katkısının modifiye bağlayıcıların yapısında meydana gelen kısa süreli yaşlanma sonucundaki kütle kayıplarının giderek azaldığı ve şartname limitinin (maks. 0.5) [47] oldukça altında kaldığı görülmektedir. HÇT katkısının bu sonuca göre, bağlayıcıların uçucu madde kaybı üzerinde negatif bir etkiye sahip olmadığı ifade edilebilir. Bu sonucun, HÇT'nin lifli yapısından dolayı kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir.

RV test sonuçları

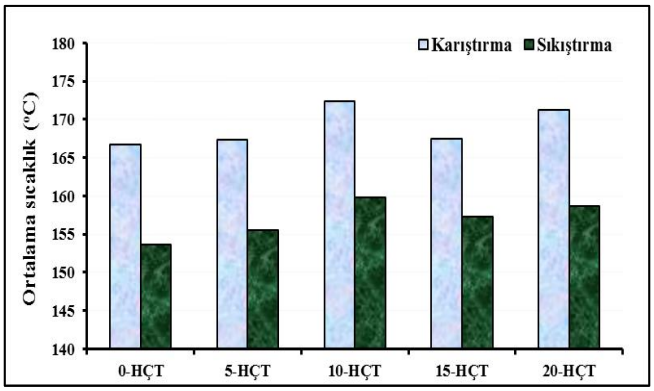
Çalışmada, HÇT katkısının bağlayıcıların işlenebilirlik sıcaklıkları üzerindeki etkisini belirleyebilmek için 135 ºC ve 165 ºC sıcaklıklarda tüm bağlayıcıların viskozite değerleri belirlendi. Bağlayıcılara ait her iki sıcaklıktaki viskozite değerleri Şekil 9'da, bu değerlerin kullanılarak bağlayıcılara ait belirlenen ortalama işlenebilirlik sıcaklıkları ise Şekil 10'da verilmiştir.

Şekil 9'a bakıldığında, HÇT katkısıyla her iki sıcaklık değerinde de bağlayıcıların viskozite değerleri katkısız bağlayıcıya (0-HÇT) göre artış göstermiştir. Meydana gelen artışlar 0-HÇT'ye göre 135 ºC'de %4.2, %14.7, %19.3 ve %30.0 kadar, 165 ºC'de %4.4, %28.5, %7.2 ve %21.3 kadardır. Artış oranları dikkate alındığında 20-HÇT katkılı bağlayıcıların en yüksek viskozite değerlerine sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Bağlayıcıların ortalama işlenebilirlik sıcaklıklarındaki değişime bakıldığında (Şekil 10), 0-HÇT'ye göre karıştırma sıcaklığında %0.42, %3.4, %0.48 ve %2.7; sıkıştırma sıcaklığında ise % 1.2, %4.0, %2.4 ve 3.3 kadar artışlar olmuştur. En yüksek artışlar diğer deney sonuçlarında olduğu gibi %20 HÇT katkılı bağlayıcılardan elde edilmiştir. İşlenebilirlik sıcaklıklarındaki artış, bağlayıcıların sertliğindeki artış sebebiyle beklenen bir sonuç olup, bu durum HÇT katkılı bağlayıcıların plentte hazırlanma (karıştırma) ve yol inşası esnasındaki sıkıştırma anındaki enerji sarfiyatının artacağını ifade etmektedir. Fakat, HÇT katkısının bir atık olduğu ve çevreye verdiği zarar göz önünde alındığında bu durumun ihmal edilebileceği değerlendirilmektedir.



Şekil 9. HÇT katkısının viskozite değerlerine etkisi.



Şekil 10. Bağlayıcıların ait ortalama işlenebilirlik sıcaklık değerleri.

Sonuçlar

Tarımsal bir artık olan hurma çekirdeği tozu (HÇT)'nun bitümlü bağlayıcıların konvensiyonel ve işlenebilirlik özellikleri üzerindeki etkisinin araştırıldığı bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Yumuşama değerlerine bakıldığında, HÇT oranı arttıkça bağlayıcıların sıcaklığa karşı dirençlerinin arttığı, yani yumuşama değerlerinin yükseldiği görülmüştür. Bu durumda, HÇT ilavesiyle bitümlerin yüksek sıcaklık altındaki direncinin artarak daha yüksek sıcaklığa sahip bölgelerde kullanılabileceği söylenebilir.

2. Penetrasyon değerlerine bakıldığında, HÇT katkısı ile bağlayıcıların kıvamının arttığı, yani penetrasyon değerlerinin giderek azaldığı görülmüştür. Bununla birlikte, bu sonuçların yumuşama sonuçları ile uyum içinde olduğu, kıvamın azalmasıyla bağlayıcıların sertleşerek yüksek

sıcaklık altındaki bozulma direncinin arttığını ifade etmek mümkündür.

3. PI değerlerine bakıldığında, HÇT katkısı ile genel olarak bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılıklarının azaldığı belirlenmiştir.

4. Bağlayıcıların uzama kabiliyetleri değerlendirildiğinde (düktilite), HÇT ilavesi ile uzama miktarlarında büyük oranda azalmalar meydana geldiği görülmüştür. Modifiye bağlayıcı şartname limiti (min.100) aşılmadığından bu azalmalar olumsuz olarak değerlendirilmemektedir.

5. Kütle kaybı değerlerine göre, HÇT katkısının bağlayıcıların kısa süreli yaşlanması üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

6. RV sonuçları değerlendirildiğinde, HÇT katkısı ilave bitümlerin sertliğinin artması sebebiyle işlenebilirlik sıcaklıklarının arttığı ve bu sebeple de enerji tüketiminin artacağı görülmüştür. Enerji tüketimindeki bu artışın, atık HÇT'nin çevreye verdiği olumsuzluklar göz önüne alındığında ihmal edilebileceği değerlendirilmektedir.

Sonuçta, HÇT katkısının bitümün kıvamını azalttığı ve bitümü sertleştirdiği, ayrıca işlenebilme sıcaklıklarını arttırdığı belirlenmiştir. Ek olarak, HÇT'nin yol mühendisliğinde doğrudan bir katkı malzemesi olarak kullanılabileceği ve böylece bu tarımsal artıkların çevreye verdiği zararı oldukça azaltarak ülke ekonomisine faydalar sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Kaynaklar

[1] J. Gao, H. Wang, Z. You, M. R. Mohd Hasan, Y. Lei, ve M. Irfan, "Rheological behavior and sensitivity of wood-derived bio-oil modified asphalt binders", Appl. Sci., c. 8, sayı 6, s. 919, 2018.

[2] N. S. A. Yaro vd., "Evaluation of the impact of short-term aging on volumetric and Marshall properties of palm oil clinker fine modified asphalt concrete (POCF-MAC)", içinde Journal of Physics: Conference Series, 2021, c. 1793, sayı 1, s. 12054.

[3] S. A. Tahami, M. Arabani, ve A. F. Mirhosseini, "Usage of two biomass ashes as filler in hot mix asphalt", Constr. Build. Mater., c. 170, ss. 547–556, 2018.

[4] M. R. Hainin vd., "Performance of hot mix asphalt mixture incorporating kenaf fibre", içinde IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, c. 140, s. 12092.

[5] M. T. Rahman, A. Mohajerani, ve F. Giustozzi, "Recycling of waste materials for asphalt concrete and bitumen: A review", Materials (Basel)., c. 13, sayı 7, s. 1495, 2020.

[6] N. S. A. Yaro vd., "Modeling and optimization of asphalt content, waste palm oil clinker powder and waste rice straw ash for sustainable asphalt paving employing response surface methodology: A pilot study", Clean. Mater., c. 8, s. 100187, 2023.

[7] S. Xu vd., "Application of reactive rejuvenator in aged SBS modified asphalt regeneration: A review", Constr. Build. Mater., c. 421, s. 135696, 2024.

[8] Y. Zhao vd., "Aging characteristics and microscopic mechanisms of SBS asphalt based on coupled light–heat–water aging", Constr. Build. Mater., c. 456, s. 139190, 2024.

[9] Y. Wen vd., "Evaluation on the fatigue and self-healing properties of aged and rejuvenated SBS-modified asphalt", Constr. Build. Mater., c. 412, s. 134773, 2024.

[10] J. Wu vd., "Recent development and application of natural fiber in asphalt pavement", J. Clean. Prod., s. 141832, 2024.

[11] I. U. Usman ve M. Kunlin, "Influence of Polyethylene Terephthalate (PET) utilization on the engineering properties of asphalt mixtures: A review", Constr. Build. Mater., c. 411, s. 134439, 2024.

[12] C. A. Vargas ve A. El Hanandeh, "Eco-friendly asphalt mixtures: examining the performance of PE pyrolytic wax-modified bitumen for road construction", Clean Technol. Environ. Policy, c. 26, sayı 2, ss. 447–465, 2024.

[13] M. Arabani, A. Amiri, ve M. H. Hassanjani, "Utilizing olive pomace oil and the extrusion of SBS and PVC to enhance the physical and rheological characteristics of asphalt binder", Case Stud. Constr. Mater., c. 21, s. e04097, 2024.

[14] S. Jain, A. K. Chandrappa, ve R. Neelancherry, "Utilization of Agricultural Wastes and By-Products in Asphalt: A Critical Review", Agric. Waste to Value-Added Prod. Bioprod. its Appl., ss. 207–227, 2024.

[15] A. A. A. Abdelmagid ve Y. Qiu, "Repurposing agricultural waste: The effectiveness of peanut husk ash in improving asphalt mixture properties", Constr. Build. Mater., c. 411, s. 134476, 2024.

[16] N. Bardella, M. Facchin, E. Fabris, M. Baldan, ve V. Beghetto, "Waste cooking oil as eco-friendly rejuvenator for reclaimed asphalt pavement", Materials (Basel)., c. 17, sayı 7, s. 1477, 2024.

[17] A. Ahmed, S. Ali, A. Ahmed, ve F. Khan, "Investigating the Impact of Domestic Sewage on Asphalt Concrete Pavement Strength", Eng. Technol. Appl. Sci. Res., c. 14, sayı 2, ss. 13617–13623, 2024.

[18] S. Shirzad ve H. Zouzias, "Enhancing the performance of wood-based bio-asphalt: strategies and innovations", Clean Technol. Environ. Policy, c. 26, sayı 7, ss. 2095–2115, 2024.

[19] M.E. Çeloğlu, "Farklı Biyokütlelerin Pirolizinden Elde Edilen Biyoçarların Bitüm Ve Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılabilirliğinin Araştırılması", Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2020.

[20] Y. Avşar, "Atık Yönetimi Stratejisi Olarak 'Sıfır Atık Projesi' ve Türkiye'deki Uygulama Örnekleri", Türk Yönetim ve Ekon. Araştırmaları Derg., c. 5, sayı 2, ss. 82–93, 2024.

[21] A. Akdeniz ve J. P. Svensson, "Sürdürülebilir Atık Yönetimi ve Geri Dönüşüm", Akad. Bakış Tur. Sektörü, s. 1, 2024.

[22] M. A. Alkur, P. Uyanık, S. Göncü, Z. Y. Avdan, ve K. Gedik, "Endüstriyel atık suların proseste tekrar kullanılabilirliğine yönelik metodolojik değerlendirme", Int. J. Eng. Res. Dev., c. 16, sayı 1, ss. 383–393, 2024.

[23] Ö. Apaydın, "Evsel katı atıkların kaynakta ikili ayrılması özel halinin çevresel, ekonomik, sosyal ve teknik kriterler açısından analitik hiyerarşi prosesi yardımıyla analizi", Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg., c. 1000, sayı 1000, s. 0.

[24] Y. Ayaz, M. A. Kırpık, T. Daldal, S. Çakır, ve A. Daldal, "Evsel Atık Suları ile Yağmur Sularının Geri Dönüşüm Serüveni", Kafkas Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg., c. 16, sayı 2, ss. 63–69, 2024.

[25] H. Yıldız, "Tarım Atıklarından Aktif Karbon Üretimi ve Atıksudan Boya Giderimi: Karakterizasyon, Kinetik ve Denge Çalışmaları", Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Derg., c. 27, sayı 6, ss. 1269–1281, 2024.

[26] İ. Ö. Gökdeniz ve B. Bağrıaçık, "Şeker Pancarı Atığı Katkılı Kil Zeminin Serbest Basınç ve Konsolidasyon Verilerinin İrdelenmesi", Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Derg., c. 39, sayı 4, ss. 1081–1092.

[27] T. Uslu, "Biberiye (Rosmarinus Officinalis L.) Bitkisi İçin Bazı Atıkların Yetiştirme Ortamı Olarak Kullanılması Ve Bitkinin Gelişimi Üzerine Etkileri". Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi-Fen Bilimleri Enstitüsü, 2024.

[28] M. Gencay, "Tütün ve Tütün Mamulleri Atıklarının Denizel Çevreye Etkileri: Konyaaltı Sahili ve Denizel Bölgesi". Kapadokya Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim, Öğretim ve Araştırma Enstitüsü, 2024.

[29] B. Yemen ve S. Belgüzar, "Yağlık Ayçiçeği Üretiminde Karşılaşılan Bitki Koruma Sorunlarının Belirlenmesi: Sivas İli Örneği, Türkiye", Türkiye Tarımsal Araştırmalar Derg., c. 11, sayı 1, ss. 48–57, 2024.

[30] N. Yıldız ve M. Sohrabi, "Hurma Ağacının (Phoenix dactylifera L.) İklim ve Toprak İstekleri", Uluslararası Mühendislik Tasarım ve Teknol. Derg., c. 1, sayı 2, ss. 64–70, 2019.

[31] S. A. F. Mirhosseini, M. M. Khabiri, A. Kavussi, ve M. H. J. Kamali, "Applying surface free energy method for evaluation of moisture damage in asphalt mixtures containing date seed ash", Constr. Build. Mater., c. 125, ss. 408–416, 2016.

[32] S. Zafar, "No Title", 2023. https://www.ecomena.org/biomass-date-palm-wastes/

[33] M. Arabani ve M. H. Hassanjani, "The influence of olive kernel ash obtained from canning factory as a bitumen modifier", Constr. Build. Mater., c. 441, s. 137532, 2024.

[34] M. A. Tarar, A. H. Khan, Z. Ur Rehman, S. Qamar, ve M. N. Akhtar, "Compatibility of sunflower oil with asphalt binders: a way toward materials derived from renewable resources", Mater. Struct., c. 53, ss. 1–15, 2020.

[35] A. Garcia, C. J. Austin, ve J. Jelfs, "Mechanical properties of asphalt mixture containing sunflower oil capsules", J. Clean. Prod., c. 118, ss. 124–132, 2016.

[36] T. Khedaywi, N. Al Kofahi, ve M. Al-Zoubi, "Effect of olive waste ash on properties of asphalt cement and asphalt concrete mixtures", Int. J. Pavement Res. Technol., c. 13, ss. 276–285, 2020.

[37] J. Liu, Z. Li, H. Chen, B. Guan, ve K. Liu, "Investigation of cotton straw fibers for asphalt mixtures", J. Mater. Civ. Eng., c. 32, sayı 5, s. 4020105, 2020.

[38] X. Yu vd., "Influence of chemically-modified cotton straw fibers on the properties of asphalt mortar", Case Stud. Constr. Mater., c. 18, s. e01787, 2023.

[39] A. Foroutan Mirhosseini, A. Kavussi, M. H. Jalal Kamali, M. M. Khabiri, ve A. Hassani, "Evaluating fatigue behavior of asphalt binders and mixes containing Date Seed Ash", J. Civ. Eng. Manag., c. 23, sayı 8, ss. 1164–1175, 2017.

[40] S. AlKheder, M. Alkhedher, ve K. A. Alshraiedeh, "The effect of using activated dates seed on Hot Mix Asphalt performance", Constr. Build. Mater., c. 269, s. 121239, 2021.

[41] Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-Yumuşama noktası tayini-Halka ve bilye yöntemi, TS EN 1427, 2015.

[42] Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-İğne batma derinliği tayini, TS EN 1426, 2025.

[43] Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar - Kuvvet uygulamalı süneklik yöntemiyle modifiye bitümün gerilme özelliklerinin belirlenmesi, TS EN 13589, 2018.

[44] Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt Binder (Rolling Thin-Film Oven Test), ASTM D2872, 2022.

[45] Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer, ASTM D 4402, 2012.

[46] C. B. İnce, "Çöp Atıklarından Elde Edilen Geopolimerlerin Sıcak Karışım Asfalt Kaplamalarda Kullanımının Araştırılması", Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İnönü Üniversitesi, Malatya, 2023.

[47] K. G. Müdürlüğü, Karayolu Teknik Şartnamesi. İstanbul, 2023.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur."

"Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır."

Teşekkür

Bu çalışmada, laboratuvar çalışmalarında yardımları olan Mersin Karayolları Bölge Müdürlüğüne ait yol inşaatı şantiyesinde çalışan arkadaşım İnş. Müh. Erhan Güldoğan'a katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Dicle University
Journal of Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/dumf
duje.dicle.edu.tr

Araştırma Makalesi / Research Article

TBDY 2018'e Göre Sıvılaşma Potansiyeli Analizi için Bir Geoteknik Web Uygulamasının Geliştirilmesi

Development of a Geotechnical Web Application for Liquefaction Potential Analysis According to TEC 2018

Muhammet Dingil[1*], Betül Keseroğlu[2], Yakup Türedi[3], Murat Örnek[4]

[1] İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hatay, 31200, Türkiye
muhammetdingil.mfbe19@iste.edu.tr, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8681-478X

[2] İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hatay, 31200, Türkiye
betulkeseroglu.lee21@iste.edu.tr, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9121-0510

[3] İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hatay, 31200, Türkiye
yakup.turedi@iste.edu.tr, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9197-5214

[4] İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hatay, 31200, Türkiye
murat.ornek@iste.edu.tr, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0809-2531

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 7 Mart 2025
Revizyon 11 Nisan 2025
Kabul 29 Nisan 2025
Online 30 Haziran 2025

Anahtar Kelimeler:

Zemin Sıvılaşması, Sıvılaşma Analizi, Geoteknik Yazılım, İnternet Tabanlı Uygulama

ÖZ

Zeminin sıvılaşması, Türk Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) 2018'de yer alan önemli geoteknik inceleme konularından biridir. TBDY 2018 Bölüm 16.6 ve Ek 16B'de, zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin analizi için basitleştirilmiş bir çözüm yöntemi yer almaktadır. Bu çalışmada, TBDY 2018'de yer alan yöntem esasına dayanarak sıvılaşma potansiyeli çözümlemesi yapabilen bir geoteknik web uygulaması geliştirilmiştir. Oluşturulan yazılım, girdi olarak gerekli geoteknik tasarım parametrelerini, tek tabakalı ya da katmanlı zemin durumu için TBDY 2018'e göre analiz edebilmektedir. Yazılımda, toplam ve etkin düşey gerilme, düzeltilmiş SPT sayısı, depremde oluşan kayma gerilmesi, sıvılaşma direnci, güvenlik sayısı gibi hesaplanan değerler, çıktı olarak bir dizelge halinde sunulmaktadır. Çözümleme yapılan zemin örneğine ait sondaj derinliği-güvenlik sayısı profili de bir grafik olarak paylaşılmaktadır. Bu geoteknik yazılım, internet tabanlı olarak bir web sunucusu üzerinden ya da ağ bağlantısız herhangi bir işletim sisteminde derlenebilen, açık kaynak ve çapraz platform bir web uygulamasıdır.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 7 March 2025
Received in revised form 11 April 2025
Accepted 29 April 2025
Available online 30 June 2025

Keywords:

Soil Liquefaction, Liquefaction Analysis, Geotechnical Software, Web-Based Application

ABSTRACT

Soil liquefaction is an important topic of geotechnical investigation in the Turkish Earthquake Code (TEC) 2018. Section 16.6 and Annex 16B of TEC 2018 include a simplified solution method for the analysis of liquefaction potential of soils. This study developed a geotechnical web application that can analyze liquefaction potential based on the principle in TEC 2018. The software can analyze the required geotechnical design parameters as input according to TEC 2018 for single-layer or layered soil conditions. In this software, the outputs include calculated values such as total and effective vertical stress, corrected SPT number, shear stress, liquefaction resistance, and safety factor, presented in a table. The drilling depth-safety factor profile of the analyzed soil sample can also be shared as a chart. This geotechnical software is an open-source and cross-platform web application that can be compiled on an internet-based web server or on any network-free operating system.

DOI: 10.24012/dumf.1653529

* Sorumlu Yazar

Giriş

Sıvılaşma ani tekrarlı yükler altında, özellikle suya doygun gevşek kohezyonsuz zeminlerde, drenajsız koşullarda boşluk suyu basıncının giderek artmasıyla zeminin kayma dayanımında ve rijitliğinde ciddi azalma meydana gelmesiyle zeminin geçici olarak kayma direncini yitirmesi olayıdır. Zeminlerin sıvılaşması neticesinde; yüzeysel temele oturan yapılarda zemine batma veya yan dönme; iletim hatları ve benzeri gömülü yer altı yapılarında yüzeye çıkma, bölgesel deformasyon, kum kaynaması, şev duraylılık kayıpları, akma göçmesi, yanal yayılma, dayanma yapısı yenilmesi gibi çok çeşitli hasarlar görülebilmektedir [1]-[7].

Türkiye'de son olarak 6 Şubat 2023'te, Pazarcık ve Elbistan'da (Kahramanmaraş) sırasıyla 7.7 ve 7.6 moment büyüklüğünde iki büyük deprem; bölgede artçı şok aktivitesi sürerken 20 Şubat 2023'te ise Yayladağı'nda (Hatay) 6.4 moment büyüklüğünde bir tetiklenmiş deprem yaşanmıştır [8]. Bu depremlerin neticesinde de birçok yerde, sıvılaşma olaylarının açık bir biçimde gerçekleştiği görülmüş; sıvılaşma sonucunda çökme, kum kaynaması, taşıma gücü yenilmeleri, yanal kaymalar ve aşırı oturmalar gibi hasarlar gözlemlenmiştir [9].

Sıvılaşma olayı, geoteknik ve deprem mühendisliğinin öne çıkan inceleme alanlarından biri iken sıvılaşma potansiyeline sahip zemin katmanlarının belirlenmesi de büyük bir gerekliliktir [10]-[13]. Bu nedenle, zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin çözümlenmesi için zemin özelliklerine ve depremsel koşullara bağlı çeşitli analiz ve değerlendirme yöntemleri bulunmaktadır. Zemin sıvılaşma analizi; depremden kaynaklı ek kayma gerilmelerinin hesaplanarak, zeminin direncini geçip geçemeyeceğinin saptanması esasına dayanmaktadır [14]. Seed ve Idriss [15] tarafından ortaya koyulan basitleştirilmiş sıvılaşma potansiyeli metodu ile bu yöntemi temel alarak Youd ve diğerleri [16] tarafından önerilen bağıntılar; sıvılaşma potansiyelinin çözümlenmesinde, en yaygın kullanılan formüller olarak öne çıkmaktadır [17]-[18]. Geoteknik mühendisliğinde, yapılan çalışmalar ve araştırmalar sonucu, birçok farklı sıvılaşma potansiyeli belirleme yöntemleri de yer almaktadır [19]-[30].

Türkiye'de deprem etkisi altında binaların tasarımı için esaslar, 2018 yılında yayınlanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) kapsamında ayrıntılı bir şekilde belirtilmiştir [31]. TBDY 2018'de sıvılaşma potansiyeli, Bölüm 16.6'da detaylarıyla irdelenmiştir ve analiz yöntemi olarak Ek 16B'de basitleştirilmiş zemin sıvılaşma değerlendirmesi paylaşılmıştır. TBDY 2018'e göre sıvılaşma potansiyeli analizi; birtakım geoteknik laboratuvar ve arazi deneyi parametreleri ile deprem tasarım verilerinin, koşullu denklemlere göre çözümlenmesiyle belirlenmektedir. Bu koşullu denklemlerde, geoteknik deney ve tasarım şartlarına bağlı olarak birçok katsayı hesaplanmaktadır.

Sıvılaşma potansiyeli analizi de dâhil olmak üzere, geoteknik mühendisliğinin birçok çalışma alanında, bu tür koşullu ve karmaşık hesaplamalar için bilgisayar programları tercih edilebilmektedir. Geoteknik laboratuvar ve arazi deneylerinin yer aldığı veri çözümlemelerinde, bilgisayar programı olarak, özel amaçlı ticari yazılımlardan ve elektronik çizelge yazılımlarından yararlanıldığı görülmektedir [32]. Sıvılaşma analizini çeşitli yönetmelik, standart ya da formülasyon esasına göre gerçekleştiren bazı program ve yazılımlar, bilimsel çalışmalarda yer almaktadır [33]-[41].

Bu çalışmada, TBDY 2018'de yer alan basitleştirilmiş sıvılaşma potansiyelini çözümleyebilen, internet tabanlı veya ağ bağlantısız olarak kullanılabilen çapraz platform bir geoteknik yazılım tasarlanmıştır. Bu geoteknik web uygulamasında, TBDY 2018 esasına göre gerçekleştirilecek bir sıvılaşma analizi için gereken geoteknik deprem parametreleri, kullanıcı etkileşimli olarak belirlenebilmektedir ve sıvılaşma potansiyeli irdelenen tek tabakalı veya katmanlı zemin örneğine ait derinlik-güvenlik sayısı profili, çözümleme sonucunda doğrudan bir görsel grafik olarak yazılımda sunulmaktadır.

Teori

TBDY 2018'e göre zemin sıvılaşması kavramı, Bölüm 16.6 "*Deprem Etkisi Altında Zeminin Sıvılaşma Riskinin Değerlendirmesi*" başlığı altında ele alınmıştır. Sıvılaşma potansiyelinin analizinde kullanılabilecek bir yöntem olarak, basitleştirilmiş zemin sıvılaşma değerlendirmesi, TBDY 2018 Ek 16B'de sunulmuştur. TBDY 2018 Bölüm 16.6.4'te, yer altı su seviyesinin altındaki çakıllı kum, kum, siltli killi kum, plastik olmayan silt ve silt-kum karışımları; potansiyel sıvılaşabilir zeminler olarak kabul edilmiştir. TBDY 2018 Bölüm 16.6.8'de ise zemin sıvılaşma değerlendirmesi; Standart Penetrasyon Testi (SPT), Koni Penetrasyon Testi (CPT) veya Kayma Dalgası Hızı Testine (VS) göre belirlenebileceği ifade edilmiştir. CPT ve VS deneylerine göre sıvılaşma potansiyelinin saptanabilmesi için genel kabul gören yöntemlerin kullanılması gerektiği paylaşılmıştır.

Zemin sıvılaşma değerlendirmesinin, SPT deney sonuçları esas alınarak gerçekleştirilmek istenmesi durumunda ise TBDY 2018 Ek 16B'de bir basitleştirilmiş yöntem sunulmuştur. Sıvılaşmaya karşı güvenlik koşulu, TBDY 2018 Bölüm 16.6.9'a göre, τ_R (sıvılaşma direnci) ile τ_{deprem} (zeminde depremden oluşan ortalama tekrarlı kayma gerilmesi) oranının 1,10 değerinden büyük olması şeklinde tanımlanmıştır. TBDY 2018'de, SPT deney sonuçlarını kullanarak zemin sıvılaşma direncinin (τ_R) hesaplanması için Ek 16B.3'te; deprem esnasında gelişen kayma gerilmelerinin hesaplanması (τ_{deprem}) için ise Ek 16B.4'te birtakım denklemler verilmiştir. TBDY 2018 Ek 16B'de verilen basitleştirilmiş zemin sıvılaşması yöntemi analiz adımlarının özeti Şekil 1'de sunulmuştur.

Sıvılaşma potansiyelinin değerlendirileceği zemin profilinde uygulanan SPT arazi deneyinden elde edilmiş ham SPT verileri (N); Çizelge 1'de verilen düzeltme katsayılarıyla çarpılarak, düzeltilmiş $N_{1,60}$ değerine dönüştürülmesi gerekmektedir (Denklem 1).

$$N_{1,60} = N * C_R * C_S * C_B * C_E * C_N \quad (1)$$

Çizelge 1'de gösterilen C_N katsayısının hesabı için kullanılan denklemde, etkin düşey gerilme σ'_{vo} (kN/m^2); SPT deneyinin gerçekleştirildiği arazi koşullarına göre hesaplanması gerekmektedir. SPT deneyi ardından ek dolgu, temel gerilmesi, zemin kazısı ve benzeri

- ***SPT verilerinin düzeltilmesi*** ($N_{1,60}$ ve $N_{1,60f}$)
  - Ham SPT verilerinin düzeltilmesi ($N_{1,60}$)
  - SPT verilerinin ince dane içeriğine göre düzeltilmesi ($N_{1,60f}$)
- ***Sıvılaşma direncinin hesaplanması*** (τ_R)
- ***Depremde oluşan kayma gerilmesinin hesaplanması*** (τ_{deprem})

Şekil 1. TBDY 2018'e göre basitleştirilmiş zemin sıvılaşması analizi adımları

Çizelge 1. TBDY 2018'e göre ham SPT verisini düzeltme katsayıları

Düzeltme Katsayısı	Değişken	Değer
C_R Tij boyu düzeltme katsayısı	3m ile 4m aralığında	0.75
	4m ile 6m aralığında	0.85
	6m ile 10m aralığında	0.95
	10m'den derin	1.00
C_S Numune alıcı tipi düzeltme katsayısı	Standart numune alıcı (iç tüpü olan)	1.00
	İç tüpü olmayan numune alıcı	1.10-1.30
C_B Sondaj delgi çapı düzeltme katsayısı	Çap 65mm-115mm arasında	1.00
	Çap 150mm	1.05
	Çap 200mm	1.15
C_E Enerji oranı düzeltme katsayısı	Güvenli tokmak	0.60-1.17
	Halkalı tokmak	0.45-1.00
	Otomatik darbeli tokmak	0.90-1.60
C_N Derinlik düzeltme katsayısı	$C_N = 9.78 * \sqrt{\frac{1}{\sigma'_{vo}}} \leq 1.70$	

gerekçelerle oluşan etkin gerilme değişikliklerinin dikkate alınmayacağı TBDY 2018'de vurgulanmıştır. Arazi deneyinden alınan ham SPT verilerinin (N), SPT düzeltme katsayıları kullanılarak $N_{1,60}$ değerine dönüştürülmesinin ardından, $N_{1,60}$ değerinde, ince dane içeriğine (IDI) göre yeniden bir düzeltmeye ihtiyaç duyulmaktadır. İnce dane içeriğine göre düzeltilmiş SPT darbe sayısı $N_{1,60f}$ Denklem (2)'ye göre hesaplanmaktadır.

$$N_{1,60f} = \alpha + \beta * N_{1,60} \quad (2)$$

$N_{1,60f}$ hesabında kullanılan α ve β katsayıları, Çizelge 2'de gösterildiği üzere ince dane içeriğine bağlı olarak koşullu belirlenmektedir.

Çizelge 2. TBDY 2018'e göre ince dane içeriğine bağlı α ve β katsayıları

$\alpha = 0$	$\beta = 1.0$	$IDI \leq \%5$
$\alpha = e^{\left(1.76 - \frac{190}{IDI^2}\right)}$	$\beta = 0.99 + IDI^{1.5}/1000$	$\%5 < IDI < \%35$
$\alpha = 5.0$	$\beta = 1.2$	$IDI \geq \%35$

$N_{1,60f}$ değerinin hesaplanmasıyla, TBDY 2018'e göre ham SPT sayısı (N) üzerinde yapılacak tüm düzeltmeler tamamlanmış olmaktadır. Sıvılaşma direncinin (τ_R) bulunabilmesi için gerekli olan çevrimsel dayanım oranının (CRR) hesabında ise Denklem (2)'deki $N_{1,60f}$ değeri kullanılmaktadır.

Bir zeminin sıvılaşma potansiyelinin karakterize edilmesi ve sıvılaşmaya karşı gösterdiği direncin ifade edilmesi, çevrimsel dayanım oranı (tekrarlı direnç oranı) kavramıyla sağlanmaktadır [42]. TBDY 2018'de zeminlerin sıvılaşmaya karşı direnç kapasitesini belirlemek için Youd ve diğerleri [16] tarafından önerilen CRR denklemi kullanılmaktadır. Moment büyüklüğü 7.5 olan depreme karşı gelen çevrimsel dayanım oranı ($CRR_{M7,5}$), Denklem (3)'te yer alan bağıntıyla hesaplanmaktadır.

$$CRR_{M7,5} = \frac{1}{34 - N_{1,60f}} + \frac{N_{1,60f}}{135} + \frac{50}{\left(10 * N_{1,60f} + 45\right)^2} - \frac{1}{200} \quad (3)$$

Tasarım depremi moment büyüklüğünün 7.5 değerinden farklı olması durumunda, $CRR_{M7,5}$ değerinin, deprem büyüklüğü düzeltme katsayısıyla (C_M) düzetilmesi gerekmektedir. Tasarım depremi moment büyüklüğü 7.5 ise C_M değeri 1 olarak alınmaktadır. C_M değeri, tasarım depremi büyüklüğüne (M_w) bağlı olarak Denklem (4)'teki denkleme göre hesap edilmektedir.

$$C_M = \frac{10^{2.24}}{{M_w}^{2.56}} \quad (4)$$

TBDY 2018'de, tasarım depremi büyüklüğünün (M_w) saptanması hususunda, özel bir açıklama bulunmamaktadır. Bu nedenle M_w değerinin seçiminde, FEMA P-750 [43] ve ASCE/SEI 7-10 [44] gibi uluslararası belgelerden yararlanıldığı görülmektedir [45]. TBDY 2018'e göre sıvılaşma direnci (τ_R), $CRR_{M7,5}$ ve C_M değerleri ile etkin düşey gerilmenin (σ'_{vo}) çarpılması sonucu, Denklem (5)'te gösterildiği gibi bulunmaktadır.

$$\tau_R = CRR_{M7,5} * C_M * \sigma'_{vo} \quad (5)$$

Bir zeminin sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı (GS), TBDY 2018'e göre, sıvılaşma direncinin (τ_R), depremde oluşan kayma gerilmesine (τ_{deprem}) oranıyla temsil edilir. τ_{deprem} hesabında; ilgili derinlikteki toplam düşey gerilme (σ_{vo}), gerilme azaltma katsayısı (r_d) ve kısa periyot tasarım

spektral ivme katsayısı (S_{DS}) kullanılır. r_d, incelenen derinliğe (z) bağlı olarak Denklem (6)'ya göre hesaplanır.

$$\begin{aligned} r_d &= 1.0 - 0.00765 * z && z \leq 9.15\ m \\ r_d &= 1.174 - 0.0267 * z && 9.15\ m < z \leq 23\ m \\ r_d &= 0.744 - 0.008 * z && 23\ m < z \leq 30\ m \\ r_d &= 0.50 && z > 30\ m \end{aligned} \quad (6)$$

TBDY 2018 yürürlüğe girmesiyle birlikte deprem bölgesi kavramı ortadan kalkmıştır ve yatay-düşey deprem taleplerinin hesaplanmasında, kısa ve uzun periyot spektral ivme değerleri ile belirli büyütme katsayılarından yararlanılmaktadır [46]. Harita spektral ivme katsayıları (S_S *ve* S_1), interaktif TDTH 2018 [47] üzerinden elde edilmektedir ve proje sahasının zemin durumu için özel katsayılarla (F_S *ve* F_1) çarpılarak, tasarım spektral ivme katsayıları (S_{DS} *ve* S_{D1}) bulunmaktadır [48].

Sıvılaşma potansiyeli incelenen zemin sahasına ait konum bilgileri kullanılarak, TDTH 2018'de kısa periyot spektral ivme katsayısı (S_S) belirlenir. S_S değerinden yararlanılarak TBDY 2018 yerel zemin sınıfına (*YZS*) bağlı, kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı (F_S), Çizelge 3'e göre seçilir ve S_{DS} değeri, bu katsayılar kullanılarak Denklem (7)'deki gibi hesaplanır.

$$S_{DS} = S_S * F_S \quad (7)$$

τ_{deprem} gerilmesi; σ_{vo}, r_d ve S_{DS} değerleri kullanılarak Denklem (8)'de yer alan bağıntıya göre hesaplanır ve bir zemin için TBDY 2018'e göre sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı Denklem (9)'daki gibi belirlenir.

$$\tau_{deprem} = 0.65 * \sigma_{vo} * (0.4 * S_{DS}) * r_d \quad (8)$$

$$GS = \frac{\tau_R}{\tau_{deprem}} = \frac{CRR_{M7,5} * C_M * \sigma'_{vo}}{0.65 * \sigma_{vo} * (0.4 * S_{DS}) * r_d} \geq 1{,}10 \quad (9)$$

TBDY 2018'e göre (Denklem 1-9), basitleştirilmiş zemin sıvılaşma analizi; Şekil 2'de özetlenmiştir.

$$N_{1,60} = N * C_B * C_E * C_N * C_S * C_R$$

$$\downarrow$$

$$N_{1,60f} = \alpha + \beta * N_{1,60}$$

$$\downarrow$$

$$CRR_{M7,5} = \frac{1}{34 - N_{1,60f}} + \frac{N_{1,60f}}{135} + \frac{50}{\left(10 * N_{1,60f} + 45\right)^2} - \frac{1}{200}$$

$$\downarrow \qquad C_M = 10^{2,24}/{M_w}^{2,56}$$

$$\swarrow$$

$$GS = \frac{\tau_R}{\tau_{deprem}} = \frac{CRR_{M7,5} * C_M * \sigma'_{vo}}{0{,}65 * \sigma_{vo} * (0{,}4 * S_{DS}) * r_d} \geq 1{,}10$$

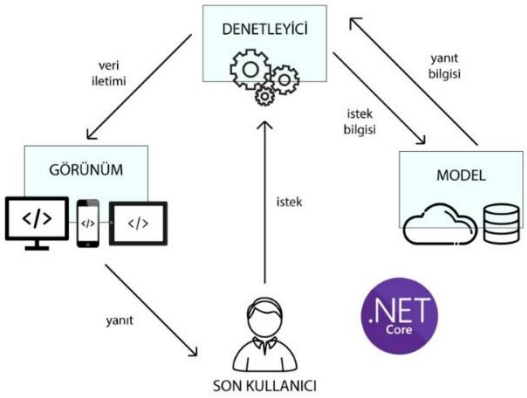
$$\uparrow$$

$$S_{DS} = S_S * F_S$$

Şekil 2. TBDY 2018'e göre sıvılaşma analizi hesap akış yolu

Tasarım

Bu bölümde, açık kaynak bir uygulama geliştirme çerçevesi olan ASP.NET Core ortamında bir geoteknik yazılım tasarlanmıştır. ASP.NET Core [49], Microsoft firması tarafından ilk kez 2016 yılında, .NET teknolojisi altında çapraz platformlara yönelik bir web çerçevesi olarak duyurulmuştur [50]-[51]. Kullanıcı arayüzlerine sahip web uygulamalarını tasarlamak için yaygınca kullanılan bir kalıp olan ve verinin yönetimi ile yönlendirmesini görünümünden ayırmayı amaçlayan tasarım deseni, MVC (Model-View-Controller) olarak tanımlanmaktadır [52]. ASP.NET Core, tasarımı kolaylaştıran ve işlemleri düzen içerisinde gerçekleştiren bir MVC mimari desen yapısına sahiptir (Şekil 3).



Şekil 3. ASP.NET Core MVC mimari yapısının çalışma döngüsü [53]

ASP.NET Core çerçevesi, tasarımlar esnasında Visual Studio Code [54] tümleşik geliştirme ortamında yüklenip kullanılmıştır. İnternet tabanlı uygulamada, görsel dinamik arayüzler HTML ve JavaScript işaretleme dilleriyle, mantıksal ve yöntemsel işlemler ise C# nesne yönelimli yazılım diliyle kodlanmıştır (Şekil 4).

Şekil 4. Uygulama tasarımında kullanılan yazılım çerçevesi ve programlama dilleri

ASP.NET Core MVC'deki tüm kodlamanın tamamlanmasının ardından, TBDY 2018'e göre zemin sıvılaşma potansiyeli analizini gerçekleştiren *SoLiqSolver* isimli bir geoteknik web yazılımı geliştirilmiştir. Bu uygulamanın tasarımında destekleyici birtakım açık kaynak yazılım geliştirme bileşenlerinden de yararlanılmıştır. Şekil 2'de özetlenen sıvılaşma analizi için gerekli bazı matematiksel işlemlerde sayısal hesaplama kütüphanesi Math.NET [55] kullanılmıştır. Web uygulamasının görsel düzeninin sağlanmasında, basamaklı biçem şablonu olarak W3.CSS [56] tercih

Çizelge 3. TBDY 2018'de kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayıları

Yerel Zemin Sınıfı	Kısa Periyot Bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_S					
	$S_S \leq 0.25$	$S_S = 0.50$	$S_S = 0.75$	$S_S = 1.00$	$S_S = 1.25$	$S_S \geq 1.50$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
ZC	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
ZD	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
ZE	2.4	1.7	1.3	1.1	0.9	0.8

edilmiştir. Sondaj derinliği-güvenlik sayısı profilini dinamik bir grafik olarak sunabilmek için ise Chart.js [57] tasarım kütüphanesinden yararlanılmıştır. Geoteknik web yazılımının derlendikten sonra görülen tasarım nitelikleri Çizelge 4'te sunulmuştur.

Çizelge 4. Geliştirilen web uygulamasının tasarım nitelikleri

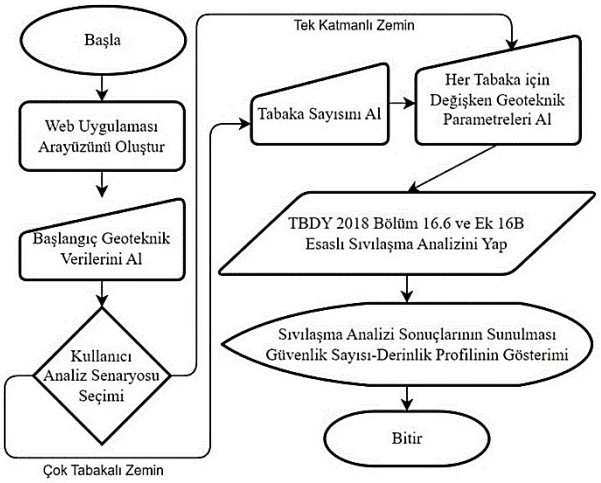
Web Geliştirme Çerçevesi	:	ASP.NET Core MVC	
Yazılım Geliştirme Kiti	:	.NET Core 3.1	
Üretilmiş Veri Döndüren Fonksiyon Sayısı	:	15	
Kullanılan Bileşenler ve Kütüphaneler	:	Math.NET, Chart.js, W3.CSS	
Yayın Versiyonu Boyutu	:	6.35 MB	
Kod Satır Sayısı	:	1181	470 Front-End 711 Back-End

Bu web uygulamasında, TBDY 2018'e göre basitleştirilmiş sıvılaşma potansiyelini analiz edebilmek için kullanıcı tarafından iki farklı şekilde veri girişi yapılması gerekmektedir. Açıklamaları Bölüm 2'de paylaşılan *YZS, S_S, M_W, C_B, C_E, C_S ile YASS* (yer altı su seviyesi) ve N_{tabaka} (tabaka sayısı) gibi başlangıç geoteknik verileri; bir sıvılaşma analizi senaryosu için gereken tabaka sayısından bağımsız değerlerdir. *Z*, N_{SPT}, Y_N* (zemin birim hacim ağırlık) ve *IDI* gibi değişken geoteknik parametreler ise irdelenen zeminin tabaka sayısı kadar giriş yapılması beklenen tekrarlı verilerdir. TBDY 2018 esaslı bir sıvılaşma analizi için gereken tüm girdi değerleri Çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelge 5. Geoteknik web yazılımının kullanıcı esaslı girdi değerleri

Tabaka Sayısı Kadar Alınan Değişken Geoteknik Parametreleri	Z (m)	N_{SPT}	γ_N (kN/m^3)	IDI (%)
Sıvılaşma Analizi için Alınan Başlangıç Geoteknik Verileri	$YASS$ (m)	YZS	S_S	M_W
	C_B	C_E	C_S	N_{tabaka}

Çizelge 5'te gösterilen başlangıç durumu verilerine ve tabaka sayısına bağlı geoteknik parametrelere dayanarak sıvılaşma potansiyelini çözümleyebilen geoteknik web yazılımının akış yolu diyagramı Şekil 5'te gösterilmiştir.

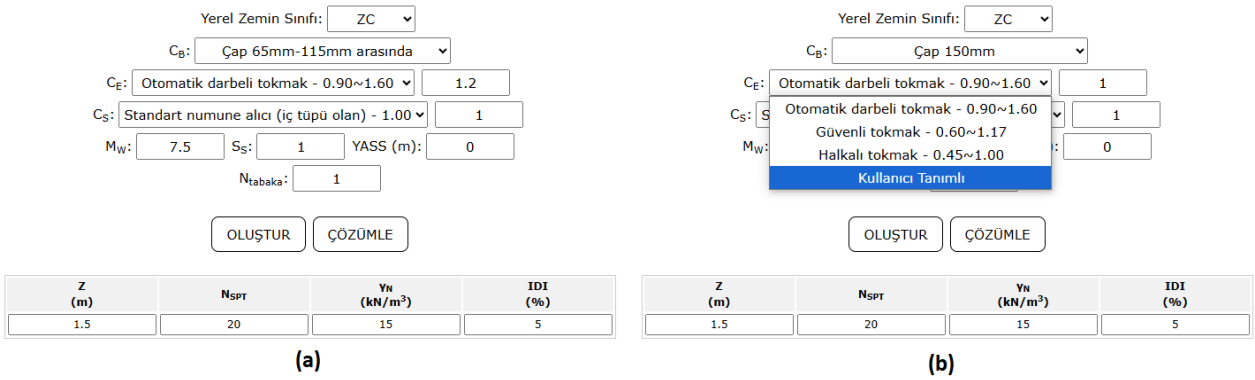


Şekil 5. Sıvılaşma potansiyelini çözümleyen geoteknik web uygulamasının akış yolu diyagramı

Bu geoteknik web uygulaması, çapraz-platform olarak istenilen her türlü aygıtta internet üzerinden veya bir işletim sisteminde yerel olarak internetten bağımsız bir biçimde çalıştırılabilmektedir. ASP.NET Core çerçevesinin sahip olduğu çapraz platform kavramı; çoklu dağıtım seçeneklerine olanak tanıyan ve farklı işletim sistemlerinde farklı CPU mimari desteklerine sahip olarak dağıtılabilme anlamına gelmektedir. Tasarlanan geoteknik yazılım, IIS Express (Internet Information Services) web sunucusu üzerinden *"localhost url"* yoluyla Windows işletim sisteminde örnek olarak çalıştırılmıştır (Şekil 6).

Bu çalışma kapsamında tasarlanan geoteknik web uygulamasının son kullanıcıya yönelik arayüz kullanım talimatları aşağıda özetlenmiştir:

- Bir sıvılaşma analizi senaryosunda önce başlangıç geoteknik verileri, listeden seçim ve veri girişi yoluyla belirlenir
- Kullanıcıdan girişi talep edilen başlangıç verilerinden biri olan enerji oranı düzeltme katsayısı (C_E) için yazılımda tanımlanan TBDY 2018 esaslı değerlere ek olarak 'Kullanıcı Tanımlı' biçiminde de C_E değeri giriş imkânı sunulmaktadır. Böylelikle, SPT deneyi esnasında kullanılan tokmak tipine veya yönteme göre farklı bir katsayı girişi de mümkündür.
- Sıvılaşma potansiyeli analizi gerçekleştirilecek zemin profiline ait tabaka sayısı girilir
- Oluştur komutuyla tabaka sayısına bağlı değişken geoteknik parametreler için bir veri alma dizelgesi oluşturulur



Şekil 6. Oluşturulan geoteknik yazılımın başlangıç arayüzü: a) Karşılama ekranı; b) Veri girişi

- Veri alma dizelgesindeki her bir zemin katmanı için derinlik, ham SPT sayısı, birim hacim ağırlık ve ince dane içeriği bilgileri girilir
- Herhangi bir zemin katmanındaki SPT deneyi, refü değerine sahip ise ham SPT verisi olarak uygulamada 'R' ifadesi girilmelidir
- Refü değerine sahip bir zemin katmanı için sadece toplam ve etkin düşey gerilme hesabı yapılırken geriye kalan çıktı değerleri için herhangi bir analiz gerçekleştirilmez
- Çözümle komutuyla TBDY 2018'e göre basitleştirilmiş sıvılaşma potansiyeli analizi gerçekleştirilerek, toplam ve etkin düşey gerilme, düzeltilmiş SPT sayısı, sıvılaşma direnci, depremde oluşan kayma gerilmesi ve güvenlik sayısı; bir sonuç dizelgesi üzerinde sunulur
- Her sıvılaşma potansiyeli çözümlemesi için, güvenlik sayısının sondaj derinliğine göre değişimini gösteren bir grafik sunulur ve ek olarak TBDY 2018 güvenlik koşulu değeri olan 1,1 sayısı için kırmızı renkli bir doğrusal hat belirtilir
- Yazılımda sunulan güvenlik sayısı-derinlik profili grafiğinde, kullanıcı tarafından girilen yer altı su seviyesi, mavi renkte yatay kesikli çizgi olarak gösterilmektedir. Benzer şekilde, kullanıcı tarafından refü olarak belirlenen bir derinlik olması durumunda, grafikte refü derinliği turuncu renkte yatay kesikli çizgi olarak temsil edilmektedir.

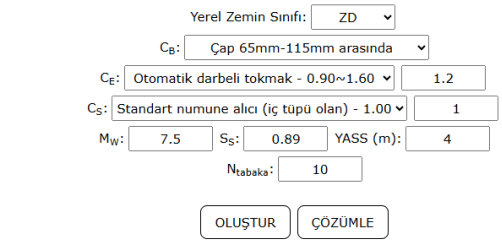
Test

Bu bölümde, tasarlanan geoteknik web uygulamasında, örnek bir zemin profili için sıvılaşma potansiyeli analizi gerçekleştirilmiş ve yazılım performansı test edilmiştir. Seçilen örnek zemin profili beş katmanlı olarak ele alınmıştır. Her bir zemin katmanında farklı sondaj derinliği, ham SPT sayısı, birim hacim ağırlık ve ince dane içeriği girilmiştir. Uygulamanın değerlendirme çeşitliliğini tam olarak ifade etmek adına, örnek zemin profilinin bir katmanındaki SPT sayısı refü olarak seçilmiştir. Toplam ve etkin düşey gerilme hesap etkisini ortaya çıkarmak için yer altı su seviyesi zemin profilinin ikinci tabakasından itibaren etki ettiği bir senaryo varsayılmıştır. Test amacıyla seçilen örnek zemin profilinin, belirtilen tüm geoteknik girdi parametreleri uygulama üzerinde Şekil 7'de sunulmuştur. Geoteknik yazılımda, Şekil 7'de verildiği üzere bilgi girişi yapılan, çok katmanlı zemin profilinin, sıvılaşma potansiyeli çözümleme sonucu ile sondaj derinliği-güvenlik sayısı profili Şekil 8'de uygulamadan alınan bir görüntüyle paylaşılmıştır.

Sonuç

Bu çalışmada, TBDY 2018'e göre basitleştirilmiş sıvılaşma potansiyeli analizini gerçekleştiren kullanıcı etkileşimli bir geoteknik web yazılımı geliştirilmiştir. Çalışma sonucunda yapılan değerlendirmeler ve ortaya koyulan sonuçlar aşağıda ifade edilmiştir:

- ✓ TBDY 2018 Bölüm 16.6'da bahsedilen ve detayları TBDY 2018 Ek 16B'de verilen, basitleştirilmiş zemin sıvılaşma değerlendirmesini referans alarak çözümleyen bir geoteknik web uygulaması tasarlanmıştır. Bölüm 2'de ayrıntıları paylaşılan basitleştirilmiş sıvılaşma analizi, sahip olduğu değişken sayısı ve koşulları itibariyle çok fazla parametreyi barındıran bir yöntemdir. Bu çalışma neticesinde kodlanan yazılımda, bu yöntem, basit seçimlerle ve belirli veri alma yapısıyla daha yalın bir hale getirilmiştir.
- ✓ Geliştirilen web uygulamasında, her bir sıvılaşma analizi için başlangıç verileri ile tabaka sayısı kadar değişken parametreler, kullanıcıdan girdi değerleri olarak beklenmektedir. Bir zemin profilinin sıvılaşma analizinde; yer altı su seviyesi, yerel zemin sınıfı, kısa periyot spektral ivme katsayısı, deprem büyüklüğü ile numune alıcı tipi, sondaj delgi çapı, enerji oranı gibi SPT deneyi düzeltme katsayıları başlangıç verileri olarak varsayılmıştır. Kullanıcıdan, irdelenen zeminin tabaka sayısına bağlı olarak, her bir ya da tek tabaka için derinlik, ham SPT sayısı, birim

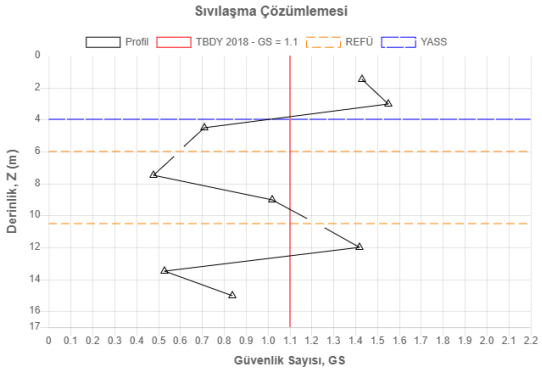


Z (m)	N_{SPT}	γ_N (kN/m³)	IDI (%)
1.5	19	15	4
3	20	15.2	0
4.5	16	16.4	1
6	R	15.8	8
7.5	10	17.1	22
9	24	15.5	6
10.5	R	16.3	19
12	22	16.5	25
13.5	19	15.9	7
15	20	17.2	26

Şekil 7. Geoteknik web uygulamasında çok katmanlı bir zemin profili için veri giriş örneği

S_S: 0.89 **S_{DS}:** 1.14 **γ_{Nort}:** 16.09 kN/m³
C_B: 1 **C_E:** 1.2 **C_S:** 1
M_W: 7.5 **YASS:** 4 m **N_{tabaka}:** 10

Z (m)	N_{SPT}	γ_N (kN/m³)	IDI (%)	N_{160f}	σ_{vo} (kN/m²)	σ'_{vo} (kN/m²)	$CRRM_{7.5}$	T_R (kN/m²)	R_D	T_{deprem} (kN/m²)	GS	Sonuç
1.5	19	15	4	29.07	22.5	22.5	0.419	9.419	0.989	6.592	1.43	SIVILAŞMAZ
3	20	15.2	0	29.64	45.3	45.3	0.45	20.363	0.977	13.119	1.55	SIVILAŞMAZ
4.5	16	16.4	1	19.8	69.9	64.99	0.218	14.163	0.966	20.005	0.71	SIVILAŞIR
6	R	15.8	8	R	93.6	73.98	NaN	NaN	NaN	NaN	-	REFÜ
7.5	10	17.1	22	17.15	119.25	84.92	0.187	15.92	0.943	33.318	0.48	SIVILAŞIR
9	24	15.5	6	29.3	142.5	93.45	0.43	40.222	0.931	39.329	1.02	SIVILAŞIR
10.5	R	16.3	19	R	166.95	103.18	NaN	NaN	NaN	NaN	-	REFÜ
12	22	16.5	25	31.34	191.7	113.22	0.609	68.964	0.854	48.501	1.42	SIVILAŞMAZ
13.5	19	15.9	7	20.45	215.55	122.35	0.226	27.663	0.814	51.977	0.53	SIVILAŞIR
15	20	17.2	26	27.2	241.35	133.44	0.349	46.568	0.773	55.333	0.84	SIVILAŞIR



Şekil 8. Geoteknik web yazılımından elde edilen örnek sıvılaşma potansiyeli analizi sonucu

hacim ağırlık ve ince dane içeriği değişken parametreleri beklenmektedir.

✓ Tek veya çok katmanlı bir zemin profilinin sıvılaşma potansiyeli analizi, yazılımda çözümlendiğinde, çıktı değerleri bir sonuç dizelgesi ve grafik şeklinde paylaşılmaktadır. TBDY 2018 Ek 16.B'de yer alan işleyiş esas alınarak, çözümlenen değerlerle birlikte toplam ve etkin düşey gerilme, düzeltilmiş SPT sayısı, sıvılaşma direnci, depremden kaynaklanan kayma gerilmesi ve güvenlik sayısı bir dizelge halinde gösterilir. Ayrıca her bir derinlik için hesaplanan güvenlik sayısı; bir grafik üzerinde, sondaj derinliği-güvenlik sayısı profili olarak sunulur.

✓ Oluşturulan geoteknik yazılım, internet yoluyla bir web sunucusu üzerinden ya da internetten bağımsız herhangi bir işletim sisteminde derlenebilen açık kaynak ve çapraz platform bir uygulamadır. Bu sayede yazılım, farklı işletim sistemlerinde herhangi bir ağ bağlantısı gerektirmeden yerel bir uygulama olarak ya da internet aracılığıyla sunucu üzerinden bir web

sayfası olarak rahatlıkla son kullanıcılara ulaşabilir durumdadır.

- ✓ Geoteknik web uygulaması; anlaşılır tasarım düzeni, sade bir arayüzü ve hesaplamalarla sınırlı veri alma yapısı sayesinde sıvılaşma potansiyeli analizini kolaylaştıran bir araç olduğu görülmektedir. Sıvılaşma potansiyeli analizini gerçekleştirmek için kullanılabilecek farklı elektronik çizelgeleme programlarına kıyasla makro ayarı, sürüm uyumu ve lisans mecburiyeti gibi gereksinimler olmamasından ötürü bu yazılımın erişim kolaylığı öne çıkmaktadır. Web yazılımı arayüzünün, sıralı seçim ya da doğrudan giriş yoluyla belirli bir veri alma yapısına sahip olması sayesinde yapılan tüm işlemlerde kullanıcı kaynaklı hata payı en düşük düzeyde tutulabilmiştir.
- ✓ Çok katmanlı zemin profili örnekleri için sıvılaşma potansiyeli analizinin çözümlenebilir ve hesap edilen tüm değerler bir dizelge halinde sunulabilir olmasından dolayı yazılım, herhangi bir geoteknik değişkenin güvenlik sayısına olan etkisini incelemek için oldukça uygundur. Bu yönüyle, geoteknik web uygulamasının gelecekteki farklı çalışmalara da konu olabileceği düşünülmektedir.

Etik Kurul Onayı ve Çıkar Çatışması Beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Teşekkür

Bu çalışmada yer alan birinci yazar, TÜBİTAK 2211-A Genel Yurt İçi Doktora Programı ve YÖK 100/2000 Doktora Projesi kapsamında desteklenmektedir.

Kaynaklar

[1] M. Selçuk, İ. Özaydın, M. Berilgen, "Sıvılaşabilen Tabakalar Üzerinde İnşa Edilen Dalgakıranların Depremler Sırasındaki Davranışı," *Sigma J. Eng. Nat. Sci. – Sigma Müh. ve Fen Bilim. Derg.*, vol. 30, no. 2, 2012.

[2] A. Ateş, "Gölyaka (Düzce) İmara Esas Yerleşim Alanındaki Zeminlerin SPT ve Sismik Hız Verileriyle Sıvılaşma Riskinin Araştırılması," *J. Polytech.*, vol. 20, no. 4, 2017.

[3] U. Dağdeviren, "Yeni Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine Göre Zeminlerin Sıvılaşma Analizi ve Sıvılaşmaya Karşı İyileştirilmesi," *Doğal Afetler ve Çevre Derg.*, vol. 5, no. 1, pp. 153–165, 2019.

[4] M. Mollamahmutoğlu, F. Babuçcu, *Zeminlerde Sıvılaşma Analiz ve İyileştirme Yöntemleri*. Akademisyen Kitabevi, 2021.

[5] C. C. Tsai, W. C. Lin, M. C. Chu, C. C. Chi, "Experimental study on the mechanism of sand boils and associated settlements due to soil liquefaction in loose sand," *Eng. Geol.*, vol. 306, p. 106708, 2022.

[6] S. Karafagka, S. Fotopoulou, D. Pitilakis, "The effect of soil liquefaction and lateral spreading to the seismic vulnerability of RC frame buildings considering SSI," *J. Earthq. Eng.*, vol. 27, no. 16, pp. 4786–4808, 2023.

[7] P. Shende, V. Barai, Y. Jaiswal, A. Lohakar, S. K. Shaw, H. A. Khan, "The study of newly established approaches to control soil liquefaction: An overview," *Mater. Today Proc.*, 2023.

[8] AFAD, "*06 Şubat 2023 Pazarcık-Elbistan (Kahramanmaraş) Mw: 7.7 – Mw: 7.6 Depremleri Raporu*," Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, TR, 2023.

[9] S. Gücek, K. B. Afacan, İ. Zorluer ,"6 Şubat 2023 Depremleri Sonrası Zemin Büyütmesi ve Sıvılaşma Gerçeği: Antakya, Gölbaşı, Türkoğlu Örnekleri," *Afyon Kocatepe Üni. Fen ve Müh. Bilim. Derg.*, vol. 23, no. 3, pp. 740–752, 2023.

[10] S. Demir, P. Özener, "Sıvılaşmanın UBC3D-PLM Model ile Tahmin Edilmesi: Santrifüj Deneyi Örneği," *Tek. Dergi*, vol. 30, no. 5, pp. 9421–9442, 2019.

[11] A. Ateş, *Zeminlerinin Sıvılaşma Potansiyelinin Arazi Ve Laboratuvar Deneyleri İle Araştırılması*. İKSAD Publishing House, 2020.

[12] K. O. Cetin, H. T. Bilge, "Recent advances in seismic soil liquefaction engineering," in *Evolution of Geotech - 25 Years Innovation.*, pp. 18–42, 2022.

[13] S. Davran, A. Özocak, S. Sert, E. Bol, "Alüvyon Zeminlerin Sıvılaşma Potansiyelinin Sayısal Analiz ile Belirlenmesi ve Zemin İyileştirmesinin Analize Etkileri," *Politek. Derg.*, vol. 27, no. 3, pp. 1029–1041, 2024.

[14] E. Bayrakçı, E. Balaban, M. İ. Onur, H. B. Özmen, E. Pekkan, "Geoteknik Mühendisliğinde 2016-2021 Yılları Arası Sıvılaşma Çalışmaları," *Disaster Sci. Eng.*, vol. 7, no. 1, pp. 11–19, 2021.

[15] H. B. Seed, I. M. Idriss, "Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential," *J. Soil Mech. Found. Div.*, vol. 97, no. 9, pp. 1249–1273, 1971.

[16] T. L. Youd *vd.*, "Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils," *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, vol. 127, no. 10, pp. 817–833, 2001.

[17] S. Durukan, E. Akbuğa, "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine (2018) Göre Sıvılaşma Potansiyeli Analizi ve Sığacık (Seferihisar/İzmir) Örneği," *Doğal Afetler ve Çevre Derg.*, vol. 6, no. 2, pp. 304–318, 2020.

[18] G. Şahin, O. Toygar, M. R. Kahyaoğlu, "A Numerical Study on the Efficiency of Jet Grout Columns in Liquefaction Mitigation," *Turk Deprem Arastirma Derg.*, vol. 4, no. 2, pp. 210–229, 2022.

[19] R. Dobry, K. H. Stokoe, R. S. Ladd, T. L. Youd, "Liquefaction susceptibility from S-wave velocity," in *Proc. In-Situ Tests to Evaluate Liquefaction Susceptibility, ASCE National Convention*, 1981.

[20] T. Iwasaki, T. Arakawa, K. I. Tokida, "Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes," *Int. J. Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 49–58, 1984.

[21] K. Kayabali, "Soil liquefaction evaluation using shear wave velocity," *Eng. Geol.*, vol. 44, no. 1–4, pp. 121–127, 1996.

[22] H. Sonmez, "Modification of the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegol, Turkey)," *Environ. Geol.*, vol. 44, pp. 862–871, 2003.

[23] K. O. Cetin *vd.*, "Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential," *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, vol. 130, no. 12, pp. 1314–1340, 2004.

[24] J. H. Hwang, C. W. Yang, D. S. Juang, "A practical reliability-based method for assessing soil liquefaction potential," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 24, no. 9–10, pp. 761–770, 2004.

[25] R. E. Moss, R. B. Seed, R. E. Kayen, J. P. Stewart, A. Der Kiureghian, K. O. Cetin, "CPT-based probabilistic and deterministic assessment of in situ seismic soil liquefaction potential," *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, vol. 132, no. 8, pp. 1032–1051, 2006.

[26] O. Uyanık, A. Taktak, "Kayma dalga hızı ve etkin titreşim periyodundan sıvılaşma çözümlemesi için yeni bir yöntem," *Süleyman Demirel Üni. Fen Bilim. Ensti. Derg.*, vol. 13, no. 1, pp. 74–81, 2009.

[27] C. H. Juang, J. Ching, Z. Luo, C. S. Ku, "New models for probability of liquefaction using standard penetration tests based on an updated database of case histories," *Eng. Geol.*, vol. 133, pp. 85–93, 2012.

[28] R. W. Boulanger, I. M. Idriss, "CPT and SPT based liquefaction triggering procedures," *Rep. No. UCD/CGM.-14*, vol. 1, p. 134, 2014.

[29] K. O. Cetin *vd.*, "The use of the SPT-based seismic soil liquefaction triggering evaluation methodology in engineering hazard assessments," *MethodsX*, vol. 5, pp. 1556–1575, 2018.

[30] J. Zhang, Y. Wang, "An ensemble method to improve prediction of earthquake-induced soil liquefaction: a multi-dataset study," *Neural Comput. Appl.*, vol. 33, no. 5, pp. 1533–1546, 2021.

[31] TBDY, "*Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) 2018*," Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, TR, 2018.

[32] M. Dingil, Y. Türedi, M. Örnek, "Geoteknik Mühendisliğinde Açık Kaynaklı Yazılım Geliştirme Araçlarının Kullanımı: Hidrometre Deneyi Örneği," *Dicle Üni. Müh. Fak. Müh. Derg., DUJE*, vol. 11, no. 3, pp. 1431–1442, 2020.

[33] C. Aydın, "*Sıvılaşma Analizi ile İlgili Bir İnceleme*," İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2008.

[34] İBB, "*İstanbul Mikrobölgeleme Projesi Anadolu Yakası Cilt II*," T.C. İstanbul Büyükşehir Belediyesi Deprem Risk Yönetimi ve Kentsel İyileştirme Daire Başkanlığı Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü, İstanbul, TR, 2009.

[35] F. Ozcep, "SoilEngineering: A Microsoft Excel Spreadsheet program for geotechnical and geophysical analysis of soils," *Comput. Geosci.*, vol. 36, no. 10, pp. 1355–1361, 2010.

[36] D. Alkaya, B. Yeşil, "Sıvılaşma Analizlerinin VBA Kullanılarak Yapılması," *Akad. Bilişim*, 2012.

[37] K. W. Franke, A. D. Wright, C. K. Hatch, "PBLiquefY: A new analysis tool for the performance-based evaluation of liquefaction triggering," in *Proceedings, 10th National Conference on Earthquake Engineering*, 2014.

[38] S. Chen, B. Tang, X. Li, "The Development of Software for Deterministic Assessment of Seismic Soil Liquefaction," in *Seventh China-Japan-US Trilateral Symposium on Lifeline Earthquake Engineering*, pp. 265–271, 2016.

[39] E. Bekin, F. Ozcep, "A comparative soil liquefaction analysis with a MATLAB based algorithm: soiLique," *Earth Sci. Res. J.*, vol. 25, no. 3, pp. 323–340, 2021.

[40] JMO, "*Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 ile Uyumlu Basitleştirilmiş Zemin Sıvılaşma Potansiyeli Analizi ve Sıvılaşma Sonrası Oturma, Yanal Deformasyon, Kayma Dayanımı Kaybı ve Kapak Tabakası Etkisi Hesap Cetveli Kullanım Kılavuzu*," TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, Ankara, TR, 2021.

[41] M. Özcan, "*Visual Basic Yazılımı Kullanılarak 2018 Deprem Yönetmeliğine Dayalı Zemin Sıvılaşma Analizi Yazılımı Geliştirilmesi*," İstanbul Gedik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2022.

[42] Y. Jafarian, R. Vakili, A. S. Abdollahi, "Prediction of cyclic resistance ratio for silty sands and its applications in the simplified liquefaction analysis," *Comput. Geotech.*, vol. 52, pp. 54–62, 2013.

[43] FEMA P-750, "*NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures. Research Paper 12 - Evaluation of Geologic Hazards and Determination of Seismic Lateral Earth Pressures*," Building Seismic Safety Council of the National Institute of Building Sciences, Washington, USA, 2009.

[44] ASCE/SEI 7-10, "*Minimum design loads for buildings and other structures*", Structural Engineering Institute, American Society of Civil Engineering, Virginia, USA, 2010.

[45] O. Alver, A. Sezen, E. E. Eseller-Bayat, "TBDY 2018'e Göre Geoteknik Tasarım: Sıvılaşma ve Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi Analizleri," *Tek. Dergi*, vol. 32, no. 5, pp. 11197–11226, 2021.

[46] V. H. Akansel, F. Soysal, K. Kadaş, P. Gülkan, "Spektrum Şiddeti Perspektifinden 2018 Türkiye Deprem Tehlike Haritası Değerlendirmesi," *Turk Deprem Arastirma Derg.*, vol. 2, no. 2, pp. 115–137, 2020.

[47] TDTH, "*Türkiye Deprem Tehlike Haritaları (TDTH) İnteraktif Web Uygulaması*," Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, TR, 2018.

[48] H. Sucuoğlu, "2019 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde Başlıca Yenilikler," *Turk Deprem Arastirma Derg.,* vol. 1, no. 1, pp. 63–75, 2019.

[49] ASP.NET Core, "Open-source Web Framework for .NET," *Microsoft Corp.*, GitHub: dotnet/aspnetcore, 2025.

[50] A. Giretti, *Introducing ASP.NET Core 6. In: Beginning gRPC with ASP.NET Core 6*. Apress, Berkeley, CA, 2022.

[51] R. A. Mezei, *Introduction to the Development of Web Applications Using ASP. Net (Core) MVC*. Springer Nature, 2023.

[52] A. Lock, *ASP.NET Core in Action*, Third Edition. Manning Publications, 2023.

[53] M. Dingil, "*Zemin Mekaniğinde Endeks Deneyleri için İnternet Tabanlı Bir Uygulamanın Geliştirilmesi*," İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2020.

[54] Visual Studio Code, "Code Editor Redefined with AI," *Microsoft Corp.*, GitHub: microsoft/vscode, 2025.

[55] Math.NET, "Open-source Numerical Library for .NET and Mono," *Math.NET Numerics*, GitHub: mathnet/mathnet-numerics, 2025.

[56] W3.CSS, "Modern, responsive, mobile first CSS framework," 2025.

[57] Chart.js, "Open-source HTML5 Charts," *Chart.js Community*, GitHub: chartjs/Chart.js, 2025.

Dicle University
Journal of Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/dumf
duje.dicle.edu.tr

Araştırma Makalesi / Research Article

İçme Suyu Dağıtım Sistemlerinin Arıza ve Altyapı Rehabilitasyon Önceliği Analizi: Erzurum İli Örneği

Failure and Infrastructure Rehabilitation Priority Analysis of Water Distribution Systems: Erzurum Province Case

Ferdi Canyurt[1], Reşat Acar[2], Burak Çırağ[3*]

[1] Atatürk Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ferdi.canyurt16@ogr.atauni.edu.tr
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0239-5837

[2] Atatürk Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, racar@atauni.edu.tr
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0653-1991

[3] Atatürk Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, burak.cirag@atauni.edu.tr
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7721-5128

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 14 Mart 2025
Revizyon 7 Nisan 2025
Kabul 16 Nisan 2025
Online 30 Haziran 2025

Anahtar Kelimeler:

Altyapı rehabilitasyon önceliği, Arıza analizi, CBS, Erzurum, İçme suyu şebekesi, Su kayıpları

ÖZ

Kentlerde içme suyu dağıtım sistemlerinin işletilmesi sırasında çeşitli teknik ve yönetsel sorunlarla karşılaşılmakta olup, bu durum sosyolojik, ekonomik ve çevresel açıdan önemli etkiler yaratmaktadır. Bu çalışmada, Erzurum kent merkezinde içme suyu şebekesinin mevcut durumu arıza kayıtları ve coğrafi bilgi sistemleri (CBS) verileri kullanılarak değerlendirilmiştir. Yapılan analizlerde, son beş yıl içinde en fazla arıza kaydı görülen mahalleler belirlenmiş ve arızaların mahallelerin fiziksel ve demografik özellikleriyle ilişkisi incelenmiştir. Özellikle Kazım Karabekir Paşa, Kurtuluş ve Rabia Ana Mahallelerinde arıza oranlarının yüksek olduğu, bunun nedeninin ise eskiyen altyapı ve düzensiz kentleşme olduğu tespit edilmiştir. Buna karşılık, Müftü Solakzade ve Adnan Menderes Mahallelerinde arıza oranlarının görece düşük olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, Erzurum kent merkezinde içme suyu su kayıpları oranının %50 seviyesinde olduğu saptanmıştır. Sonuç olarak, içme suyu şebekesinin mevcut durumu analiz edilerek, özellikle arıza oranlarının yüksek olduğu bölgelerde altyapının bakım ve rehabilitasyonunun öncelikli olarak ele alınması gerektiği ortaya konulmuştur. Çalışma kapsamında elde edilen bulgular, içme suyu şebekelerinin sürdürülebilirliği ve etkin yönetimi açısından önemli veriler sunmaktadır.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 14 March 2025
Received in revised form 7 April 2025
Accepted 16 April 2025
Available online 30 June 2025

Keywords:

Priority of infrastructure rehabilitation, Failure analysis, GIS, Erzurum, Water networks, Water losses

ABSTRACT

Various technical and managerial problems are encountered during the operation of water distribution systems in cities and this situation creates significant sociological, economic and environmental impacts. In this study, the current status of the water network in Erzurum city center was evaluated using failure records and geographic information systems (GIS) data. In the analysis, the neighborhoods with the highest number of breakdowns in the last five years were identified and the relationship between the breakdowns and the physical and demographic characteristics of the neighborhoods was examined. It was found that the failure rates were particularly high in Kazım Karabekir Paşa, Kurtuluş and Rabia Ana neighborhoods, and the reason for this was found to be aging infrastructure and irregular urbanization. On the other hand, Muftü Solakzade and Adnan Menderes neighborhoods have relatively low failure rates. It was also found that the rate of water losses in Erzurum city center was 50%. As a result, the current state of the water network was analyzed and it was revealed that maintenance and rehabilitation of the infrastructure should be prioritized, especially in areas with high failure rates. The findings of the study provide important data for the sustainability and effective management of water networks.

DOI: 10.24012/dumf.1657874

* Sorumlu Yazar

Giriş

İçme suyu dağıtım sistemleri, modern toplumların sağlıklı işleyişi için hayati öneme sahip altyapı unsurlarından biridir. Günümüzde şehirlerin ve kırsal alanların yaşam kalitesini belirleyen önemli faktörlerden biri olan içme suyu, temiz ve güvenilir bir şekilde dağıtılmalıdır. Bu sistemler, suyun arıtılmasından depolanmasına, dağıtımından tüketiciye ulaştırılmasına kadar geniş bir yelpazeyi kapsar. Bu nedenle içme suyu dağıtım sistemleri altyapı sistemlerinin temelidir. Çeşitli faktörlere bağlı olarak bu sistemlerde meydana gelen arızalar işletme kalitesini düşürmekte, maliyeti artırmakta bununla beraber şikâyetlerin artmasına sebep olmaktadır [1]-[3]. Bu sebeple dağıtım sistemleri üzerindeki arızaları minimum seviyeye indirmek sistemin işleyişi açısından çok önemlidir. Ancak bu arızaları azaltmak için uygun ve ölçülebilir bir şekilde analiz yapılmalıdır.

Literatür incelendiğinde arızaların azaltılmasına yönelik yapılan çalışmalarda, izole ölçüm bölgesi yöntemi [4]-[6], basınç kontrol yönteminin uygulanması [7]-[9], öncelikli bölgeleri belirleyerek şebeke rehabilitasyonu uygulanması [10]-[12] dikkat çekmektedir. Fırat vd. [13] illerimizde bulunan Su ve Kanal İdarelerinin su kayıpları tespitleri ve yönetimlerinin performans analizleri için web tabanlı bir model geliştirmiştir. Fırat vd. [14] su şebekeleri üzerindeki sızıntıların yönetim uygulamaları için fayda maliyet analizi yapmıştır ve aynı zamanda ekonomik kaçak seviyesi modelini önermiştir. Liemberger ve Farley [15], su kayıpları oranının azaltılması için yapılacak çalışmalarda kullanılacak verilerin sahada ölçülmesi gerektiğini ve eksik verilerin bulunduğu bölgelerde ise tahmin yöntemlerinin kullanılması gerektiğini vurgulamıştır. Kanakoudis ve Gonelas [16], yapmış olduğu çalışmada su kayıpları hacminin azaltılmasının bütün su dağıtım idarelerinin ortak ve en önemli hedefi olması gerektiğini vurgulamıştır. Ayrıca su kayıpları oranının azaltmasına yönelik yapılacak olan çalışmalar için gerekli maliyet analizlerinin hazır bulundurulması gerektiğini vurgulamışlardır. Francisque vd. [17], içme suyu dağıtım sistemlerinde idareler için hem şebekeyi yenileme hem de değiştirmek amacıyla maliyet hesabına dayalı bir destek aracı sunmuştur.

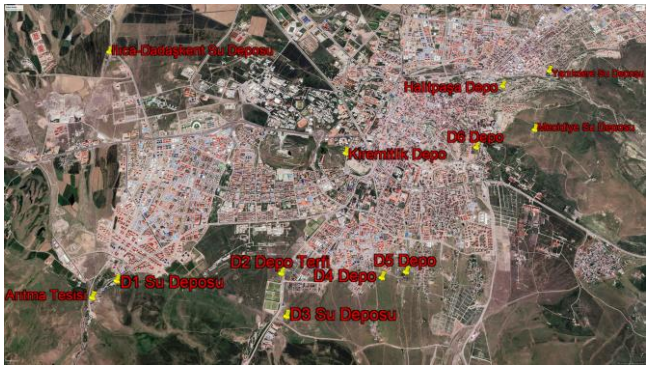
Bu çalışmada Erzurum ilinin içme suyu sistemlerinin coğrafi bilgi sistemleri ve içme suyu ihtiyacı hesabı kullanılarak değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda ilk olarak İller Bankası İçme Suyu Hesabı Metodu ile Erzurum ilinin içme suyu arıtma tesisini kullanan 17 mahalle için içme suyu ihtiyacı hesaplanmıştır. Bu ihtiyaç, arıtma tesisinden çıkan debi ile karşılaştırılarak sistemin su kayıpları performansı değerlendirilmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde yine aynı mahallelerin nüfus, arıza kaydı, bina ve abone sayılarına göre Kernel Yoğunluk Analizi yapılarak yoğunluk haritaları ile mevcut sistemin olası bir rehabilitasyon önceliği senaryosu araştırılmıştır. Çalışma, yerel yöneticilere, karar vericilere ve akademik çalışmalara içme suyu sistemlerinin değerlendirilmesi ve sistemlerin rehabilite edilmeden yapılabilecek ön analiz yöntemleri hakkında bilgiler sunmasıyla ön plana çıkmaktadır.

Materyal ve Metot

Çalışma Alanı

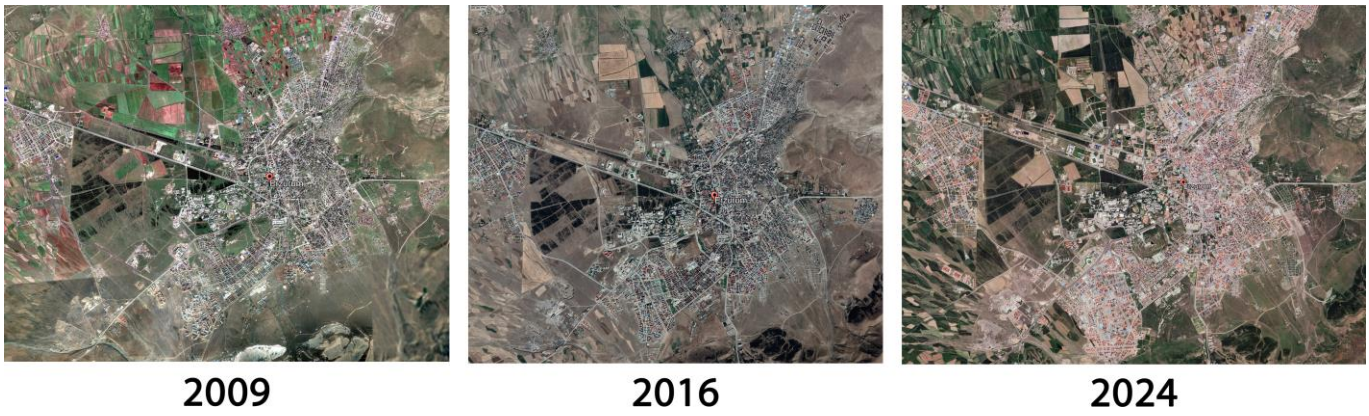
Erzurum, Doğu Anadolu Bölgesinde 39°- 55 kuzey enlemi 41-16 doğu boylamı üzerinde bulunmaktadır. İl, kuzeyden Artvin-Rize, batıdan Gümüşhane-Erzincan, güneyden Bingöl-Muş, doğudan Ağrı -Kars illeri ile çevrilmiş olup genel sınırları içinde 24768 kilometrekaredir. 1800 m rakıma sahip olan Erzurum'da yer yer yerleşim alanlarının rakımı 2000 m üzerine çıkmaktadır. Toplam nüfusu 750 bin olan Erzurum'un merkez 3 ilçesinin nüfusu 431426 kişidir. İl merkezi içme suyu hattından beslenen 3 adet merkez ilçe ve 17 adet mahalle bulunmaktadır. Merkez içme suyu hattından hizmet alan kişi sayısı 396517 kişidir [18].

Erzurum il merkezi 1940'lı yıllara kadar içme suyu ihtiyacını Palandöken Dağı'ndan gelen sular ile temin etmekteydi. Gelen sular zamanla yetersiz olması sebebi ile içme suyu ihtiyacı için 1940 ile 2008 yılları arasında Erzurum ovasında açılan 51 adet su kuyusu kullanıldı. Daha sonra Devlet Su işleri (DSİ) 8. Bölge Müdürlüğü tarafından 1995 yılında başlanılıp 2005 yılında yapımı tamamlanan Palandöken Barajı sayesinde, Erzurum il merkezinin 2008 yılından itibaren içme suyu ihtiyacı karşılanmaktadır. Yaklaşık olarak 20 km uzunluğunda ve 1500 mm çapındaki çelik borular ile gelen içme suyu hattı arıtma tesisinde arıtılarak Erzurum il merkezine dağıtılmaktadır. İl merkezine gelen yaklaşık olarak saatlik 8000 m³ içme suyu, arıtma tesisinden çıktıktan sonra il merkezinde bulunan 11 adet depoya iletilmektedir (Şekil 1). Aziziye, Palandöken ve Yakutiye olmak üzere üç merkez ilçenin 17 adet mahallesi bu su ile beslenmektedir [18]. Bu çalışmada Erzurum il merkezindeki arıtma tesisinden beslenen 3 adet merkez ilçedeki toplamda 17 adet mahalleyi kapsayan alan, çalışma alanı olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda çalışmada son 5 yıla ait gelen su debileri, nüfus verileri, arıza kaydı verileri, bina verileri ve abone sayıları kullanılmıştır.



Şekil 1. Çalışma alanı içerisinde bulunan içme suyu depoları.

Nüfus sayısı içme suyu talebiyle doğru bir orantıya sahiptir. Bu bağlamda 2009 ve 2024 yılları arasında Erzurum il merkezinin 16 yıllık değişim bölgeleri Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Erzurum ili değişim görüntüsü.

Erzurum il merkezindeki yeni yerleşim yerlerinin artışı ile gelişmekte olan mahallelerin oldukça fazla olmasının yanı sıra Yakutiye ilçesindeki mahallelerin büyük bir kısmı eski yerleşime sahip mahallelerdir. Bu sebeple şehrin içme suyu altyapı hatlarının büyük bir kısmı yeni olması ile beraber göz ardı edilemeyecek kadar da eski hatlar mevcuttur. 2009 yılından bugüne kadar il merkezinde birçok yeni yerler yerleşime açılmış olup gerekli altyapı sistemleri de yeni bölgelere doğru genişlemiştir. Çırağ vd. [19] yaptıkları çalışmada Erzurum ilindeki sürekli şehir yapılarının ve inşaat sahalarının 1990 yılından 2018 yılı arasında artış gösterdiğini belirtmişlerdir.

İçme Suyu Hesabı

Erzurum şehir merkezinin içme suyu hattından faydalanan nüfus ve özel debi gerektiren durumlar göz önüne alınarak İller Bankası İçme Suyu Hesabı Metodu [20] ile Erzurum ilinin içme suyu ihtiyacı hesaplanmıştır. İçme suyu ihtiyacı çalışma yapılan bölgenin nüfusu, tüketicilerin sosyo-ekonomik durumu, verilen suyun kalitesi, bölgenin sanayileşme durumu, iklimi, sulama yapılacak yeşil alan büyüklüğü gibi birçok etkene bağlıdır. İçme suyu ihtiyacı hesabı yapılırken bu etkenlerin hepsi dikkate alınmalıdır. Toplam içme suyu ihtiyacında evsel su ihtiyacı, ticaret, sanayi, hizmet sektörü, turizm ve hayvan suyu ihtiyaçlarından oluşur. Evsel su ihtiyacında nüfusu 400 binden fazla olan bölgeler için kişi başı günlük tüketim 150 L olarak hesaplanır (Tablo 1). Eğitim düzeyi yüksek olan bölgelerde bu sayı 100L'lere kadar düşmektedir.

Tablo 1. Evsel su ihtiyacı [20].

Proje başlangıç nüfusu (N) (kişi)	Evsel su tüketimi (L/Kişi/Gün)
N ≤ 50.000	80 - 100
50.000<N≤100.000	100 - 120
100.000<N	120 - 150

Hayvan suyu ihtiyaçlarında küçükbaşlar için günlük 20 L ve büyükbaş hayvanlar için günlük tüketim 50 L'dir [20]. Yapılan hesaplamalarda merkez içme suyu hattından faydalanan nüfus, okullar, hastaneler, fabrikalar, özel ticarethaneler, kışlalar, vb. özel debi gerektirecek bütün tesisler hesaba katılmıştır. İller Bankası İçme Suyu Hesabı Metoduna göre özel debilerin su ihtiyacını gösteren değerler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Özel debiler [20].

Tesis	Su ihtiyacı (L/Gün)
Havaalanı (kişi başı)	10-20
Hamam (kişi başı)	100
Pansiyoner (kişi başı)	190
Fabrika işçisi (Kişi başı)	100
Hastane (yatak başı)	250-600
Restoran (Kişi başı)	10-25
Okul (öğrenci başı)	95-75
Kışla (asker başı)	100
Yüzme havuzu	500 l/m²
Sinema-Tiyatro (koltuk başı)	20
Yıkama istasyonu (araç başı)	50
Mezbahada kesilen küçük baş (hayvan başı)	150-300
Mezbahada kesilen büyük baş (hayvan başı)	300-400

Yoğunluk Analizi

Yoğunluk analizleri, belirli bir bölgedeki nokta ve çizgi verilerinin mekânsal dağılımını görselleştirerek hem analiz sürecine katkı sağlamakta hem de sonuçların sade ve anlaşılır şekilde sunulmasına yardımcı olmaktadır. Farklı ölçeklerde uygulanabilen bu yöntemler, özellikle yoğunluk haritaları aracılığıyla verilerin hangi bölgelerde yoğunlaştığını etkili bir şekilde ortaya koymaktadır [21]-[23].

Bu çalışmada yoğunluk analizi yöntemlerinden birisi olan ve ArcGIS'de araç kutusu olarak bulunan Kernel Yoğunluk Analizi kullanılmıştır. Kernel Yoğunluk Analizi yöntemi, popüler etkin nokta haritalama tekniklerinden biri olup, yoğunlukların kümelenmesini belirlemek ve haritalamak için kullanılmaktadır. Bu yöntem, analiz sonuçlarının daha iyi yorumlanmasına ve değerlendirilmesine katkı sağlar. Kernel Yoğunluk Analizi, noktalar arasındaki mesafeye bağlı olarak en yoğun kümelenmenin olduğu alanları belirleyerek, bu bölgelerde en yüksek etkin noktaları oluşturur [24]. Kernel Yoğunluk Analizi, genel olarak aşağıdaki denkleme göre gerçekleşmektedir:

$$f_h(x) = \frac{1}{n}\sum\binom{n}{k}K_h(x - x_i) \quad (1)$$

burada f, yoğunluktur; K, negatif olmayan bir fonksiyon olan çekirdektir; h > 0, bant genişliği olarak adlandırılan bir yumuşatma parametresidir; x_1, x_2,..., x_n tek değişkenli bağımsız ve aynı dağılımlı örnektir [25].

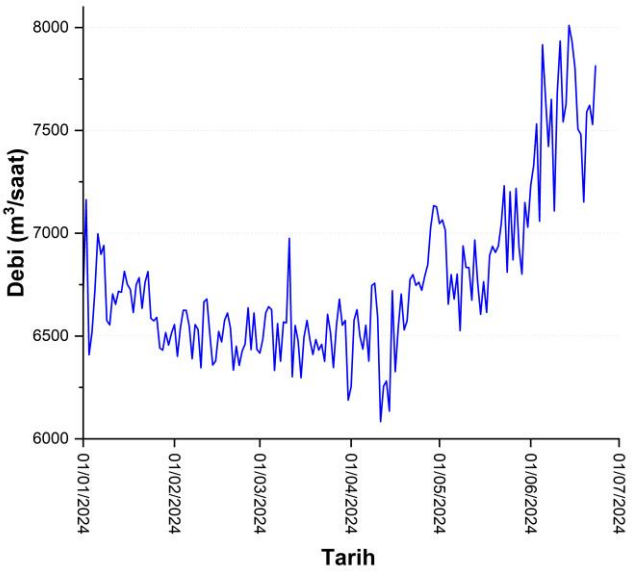
Sonuç ve Tartışma

İçme Suyu Hesabı Sonuçları

İçme suyu dağıtım sistemleri, yerleşim alanlarına uygun miktarda ve kalitede suyun sağlanması bakımından kentsel su yönetimi için oldukça önemlidir. Fakat artan su talebi ve giderek azalan su kaynakları nedeniyle içme suyu sistemlerinin doğru ve verimli bir şekilde çalışması gerekmektedir [26]. İçme suyu hatlarında meydana gelen fiziki kayıplar, kaynaktan aboneye kadar olan bütün süreçlerde meydana gelmekte ve su kaynaklarının verimsiz kullanılmasına neden olmaktadır [27]. Bu nedenle mevcut çalışmada içme suyu hesabı yapılarak arıtma tesisinden çıkan debi miktarıyla karşılaştırılma yapılması amaçlanmıştır. Yapılan içme suyu hesaplarında hesap yapılan bölgenin öncelikle nüfusa göre evsel içme suyu ihtiyacı hesaplanmıştır. Bu tüketim kişi başı günlük 150 litre olarak hesaplanmıştır. Gelişmiş ve eğitim seviyesi yüksek olan ülkelerde bu değer 100 litrelere kadar düşmektedir. Evsel su ihtiyacından sonra hesap yapılan bölgedeki özel debiler teker teker hesaba katılmalıdır. Okul, hastane, cezaevi, fabrika vb. özel debi gerektiren bütün yerlerin debileri de hesaba katılmalıdır. Hesap yapılırken alınacak olan değerler Tablo 2'de belirtilmiş olup bu değerlerden yola çıkarak Erzurum ili merkez içme suyu ihtiyacı hesaplanmıştır (Tablo 3). Yapılan bütün hesaplamalar İller Bankası İçme Suyu Hesabı Metodu [20] ile yapılmaktadır. Ayrıca Erzurum Su ve Kanalizasyon İdaresi (ESKİ) içme suyu arıtma tesisi 2024 yılının ilk 7 ayı için çıkış debileri içme suyu hesap debisiyle karşılaştırmak amacıyla temin edilmiştir (Şekil 3).

Tablo 3. İçme suyu hesabı sonuçları.

İçme suyu kullanılan alan	Debi (m³/saat)
Evsel İhtiyaç	2500
Mezbaha	5
Yıkama İst.	11
Günlük işçi	250
Sinema-Tiyatro	10
Yüzme havuzu	60
Kışla	10
Restoran	53
Hastane	95
Fabrika	42
Otel	200
Hamam	42
Havaalanı	2
Okul	720

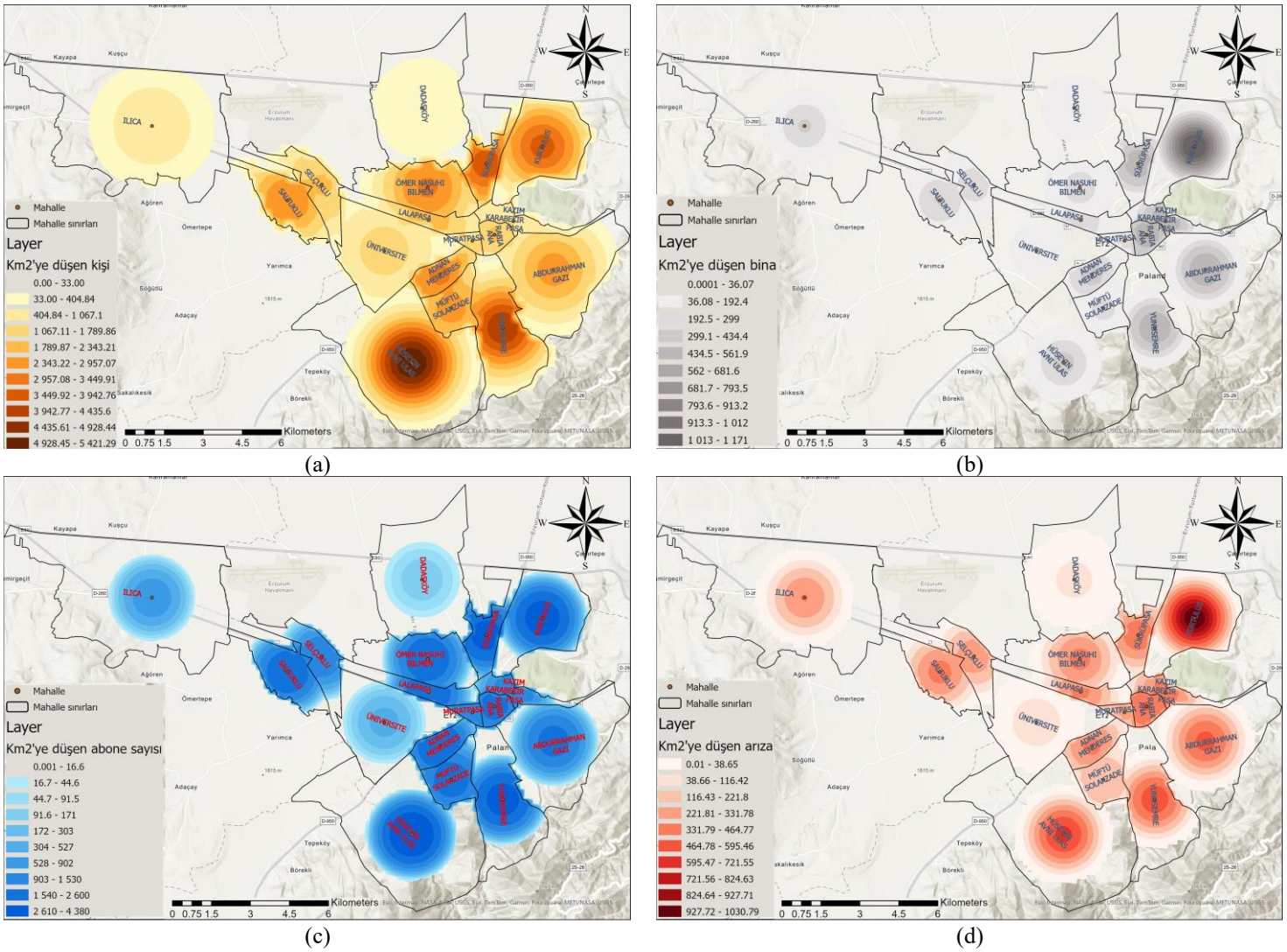


Şekil 3. Erzurum ili arıtma tesisi çıkış debileri.

Yapılan hesaplama sonuçları Tablo 3'te ayrı ayrı belirtilmiş olup toplamda 4000 m³/saat'lik bir içme suyu ihtiyacı olduğu görülmüştür. Kabul edilebilir su kayıpları oranı %25 olarak hesaplanırsa İl merkezi için saatlik 5000 m³'lük içme suyunun verilmesi yeterli olacaktır. Fakat arıtma tesisinden alınan veriler Erzurum'da kullanılan içme suyu, ihtiyacının yaklaşık olarak 2 katı olduğunu göstermektedir. Şekil 3'te 2024 yılının ilk yedi ayında Erzurum il merkezine gelen içme suyunun debi değerleri aylara göre verilmiştir. Karasal iklime sahip olan Erzurum'da yazlar sıcak ve kurak olduğu için su kullanımı fazla olmaktadır. Kış ve ilkbahar aylarında yağışların fazla olduğu ve hava sıcaklıklarının düşük olduğu için bu aylarda su kullanımı yaz aylarına göre daha azdır. Şekil 3'te 7 aylık çıkış debilerine göre Erzurum ilinin en az su tüketimi nisan ayında 6300 m³/saat olarak ölçülmüştür. En yüksek tüketim ise temmuz ayında olmuştur ve 8100 m³/saattir. Çalışma içme suyu hesabı ile gerçek debi verilerinin karşılaştırmasıyla öne çıkmaktadır.

Erzurum İli Yoğunluk Haritaları Analiz Sonuçları

Bu çalışmada, incelenen altı mahallede içme suyu altyapısının mevcut durumunu değerlendirmek amacıyla nüfus, bina sayısı, arıza sayısı ve abone sayısı verileri kullanılarak bir analiz gerçekleştirilmiştir. Verilerin mekânsal dağılımını görselleştirmek ve bölgesel yoğunluk farklılıklarını belirlemek için Kernel Yoğunluk Haritaları oluşturulmuş, elde edilen bulgular Tablo 4'teki veriler ile karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Bu kapsamda, mahalleler arasındaki su altyapısı performans farkları ortaya konularak, iyileştirme ve planlama çalışmalarına yönelik çıkarımlarda bulunulması amaçlanmıştır.



Şekil 4. Erzurum ili içme suyu arıtma tesisindeki su ile beslenen mahallere ait yoğunluk haritaları: (a) nüfus, (b) bina sayısı, (c) abone sayısı, (d) arıza sayısı.

Tablo 4. Çalışma kapsamında kullanılan mahallelere ait nüfus, bina, arıza ve abone sayıları.

Mahalle	Nüfus	Bina sayısı	Arıza sayısı	Abone sayısı	Arıza Sayısı/Abone Sayısı
Hüseyin Avni Ulaş Mah.	51414	1407	2679	18440	0.1453
Müftü Solakzade Mah..	24362	925	863	8752	0.0986
Adnan Menderes Mah.	29385	1410	1505	10779	0.1396
Kurtuluş Mah.	34839	4905	4318	14741	0.2930
Rabia Ana Mah.	17379	2148	1993	7736	0.2575
Kazım Karabekir Paşa Mah.	8854	2284	1661	5868	0.2832

Yoğunluk haritaları (Şekil 4) ve Tablo 4'deki değerlere göre yapılan analizler, içme suyu altyapısının mevcut durumunu ve olası iyileştirme gereksinimlerini ortaya koymaktadır. Kurtuluş Mahallesi hem tablodaki yüksek arıza sayısı hem de arıza yoğunluğu haritasında belirgin bir yoğunlaşma göstermektedir. Bu durum, mahalledeki bina sayısının fazlalığı ve nüfus yoğunluğu nedeniyle su şebekesi üzerindeki baskının yüksek olduğunu düşündürmektedir. Benzer şekilde, Hüseyin Avni Ulaş Mahallesi de yüksek nüfus ve abone sayısı ile dikkat çekmektedir. Arıza sayısı açısından yüksek değerlere sahip olması, bu mahallede su altyapısının zorlandığını ve bakım gerektirebileceğini göstermektedir. Çoruhlu ve Altaş [28], mevcut çalışmayla benzer bir metodoloji izleyerek Trabzon iline ait arıza noktalarını CBS ortamında analiz etmiş, verilerin öznitelik bilgilerini kullanarak yoğunluk haritaları oluşturmuşlardır. Bu haritaların, bakım ve onarım çalışmalarında zaman ve emek tasarrufu sağlama potansiyeline sahip olduğunu ifade etmişlerdir.

Yoğunluk haritaları, nüfus dağılımı ile içme suyu ihtiyacı arasındaki ilişkiyi de ortaya koymaktadır. Hüseyin Avni Ulaş Mahallesi, en yüksek nüfus yoğunluğuna sahip bölge olarak içme suyu talebinin en fazla olduğu yerleşim alanlarından biridir. Buna karşılık, Kazım Karabekir Paşa Mahallesi, en düşük nüfusa sahip mahalle olarak toplam su tüketimi açısından daha düşük değerlere sahiptir. Ancak, bina yoğunluğu haritası bu mahallede daha fazla yapı bulunduğunu göstermekte, dolayısıyla su dağıtım altyapısının planlanmasında bu durum göz önünde bulundurulmalıdır.

Arıza yoğunluğu haritası ve tablodaki veriler birlikte değerlendirildiğinde, Kurtuluş, Rabia Ana ve Kazım Karabekir Paşa Mahalleleri'nde arıza oranlarının diğer mahallelere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu mahallelerde altyapının eskimiş olması, yüksek basınç sorunları ya da aşırı yüklenme gibi etkenler arızaların sık görülmesine neden olabilir. Müftü Solakzade Mahallesi, en düşük arıza yoğunluğuna sahip mahalle olarak altyapının daha iyi durumda olabileceğini göstermektedir. Alptekin vd. [29] mevcut çalışmaya benzer şekilde, Kocaeli ilinin Darıca ve Çayırova ilçelerindeki arıza verilerini analiz ederek CBS'de yoğunluk haritaları oluşturmuştur.

Sonuç ve Değerlendirme

Yapılan bu çalışmada Erzurum ilinin merkezine ait içme suyu ihtiyacı, mevcut kullanılan içme suyu miktarı ile karşılaştırılarak şehir merkezindeki kaybolan su miktarı ve bu miktara en çok etki eden mahalleler araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan veriler 2024 yılına ait veriler olup ESKİ Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Arıtma tesisinden çıkan suyun miktarı devamlı ölçüldüğü için şehir merkezine verilen suyun miktarı devamlı kayıt altındadır.

Yapılan analizler ve oluşturulan yoğunluk haritaları doğrultusunda, Erzurum il merkezi mahallelerindeki içme suyu altyapısının mevcut durumu değerlendirilmiştir. Erzurum merkezinde içme suyu ihtiyacının yaklaşık 4000 m^3/saat olduğu belirlenmiş, ancak kullanılan su miktarının ortalama 8000 m^3/saat seviyesinde olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, %50 oranında bir su kayıpları oranına işaret etmektedir. Arıza yoğunluğu açısından değerlendirildiğinde, Kazım Karabekir Paşa Mahallesi, en fazla arıza kaydı görülen bölge olup, içme suyu hatlarının eski olması nedeniyle altyapı sorunlarının belirgin olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde, Kurtuluş ve Rabia Ana Mahallelerinde de yüksek arıza oranları gözlemlenmiş, bu durumun, yerleşim alanlarının eski olması ve su şebekesinin zamanla yıpranmasıyla ilişkili olduğu belirlenmiştir.

Bina sayıları incelendiğinde, Kazım Karabekir Paşa Mahallesinin Erzurum'daki en yoğun yapılaşmaya sahip ikinci mahalle olduğu görülmektedir. Ancak yüz ölçümünün görece küçük olması nedeniyle çarpık kentleşmenin yaygın olduğu ve bu durumun su altyapısındaki arıza sıklığını artırdığı değerlendirilmiştir. Kurtuluş Mahallesi ise hem nüfus hem de bina yoğunluğu bakımından en yüksek değerlere sahip mahallelerden biri olup, bu faktörlerin arıza sayısındaki artışa katkı sağladığı görülmektedir. Ayrıca, kentsel gelişim süreci değerlendirildiğinde, düşük arıza kaydı görülen mahallelerin yeni yerleşim alanları olduğu, buna karşın yüksek arıza kaydı bulunan mahallelerin eski kent dokusuna sahip olduğu belirlenmiştir.

Kurtuluş, Rabia Ana ve Kazım Karabekir Paşa Mahallelerinde içme suyu altyapısının bakım ve yenileme çalışmaları öncelikli olarak ele alınmalıdır. Hüseyin Avni Ulaş ve Adnan Menderes Mahallelerinde ise nüfus artışıyla birlikte uzun vadeli planlamalar yapılmalı ve altyapının sürdürülebilirliği sağlanmalıdır. Müftü Solakzade Mahallesi'nde ise mevcut altyapının korunması için düzenli bakım faaliyetlerinin devam ettirilmesi yeterli olacaktır. Genel olarak, Erzurum il merkezinde içme suyu şebekesinin iyileştirilmesi ve su kayıpları oranının azaltılması için kapsamlı rehabilitasyon çalışmalarına ihtiyaç duyulduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çalışmanın yerel yöneticilere ve karar vericilere önemli bilgiler sunduğu düşünülmektedir. Gelecek çalışmalarda, kent merkezine bağlı tüm mahalle verilerinin temin edilerek her bir mahallenin ayrı ayrı ve depo temelli analiz edilmesi, içme suyu şebekesinin performansına ilişkin daha ayrıntılı ve karşılaştırmalı sonuçların elde edilmesine olanak sağlayacaktır. Ayrıca, mevcut arıza kayıtlarına arıza nedenlerine ilişkin verilerin de eklenmesi durumunda, altyapı sorunlarının kökenine dair daha bütüncül değerlendirmeler yapılabileceği öngörülmektedir.

Kaynaklar

[1] A. O. Lambert, "International Report: Water Losses Management and Techniques," *Water Sci. Technol.: Water Supply,* vol. 2, no. 4, pp. 1–20, 2002.

[2] M. Farley and S. Trow, Losses in Water Distribution Networks: A Practitioner's Guide to Assessment, Monitoring and Control. England: *IWA Publishing,* 2003.

[3] M. Farley and R. Liemberger, "Developing a non-revenue water reduction strategy: planning and implementing the strategy," *Water Sci. Technol.: Water Supply,* vol. 15, no. 1, pp. 41-50, 2005.

[4] S. Eggimann, L. Mutzner, O. Wani, M. Y. Schneider, D. Spuhler, M. Moy De Vitry, and M. Maurer, "The potential of knowing more: a review of data-driven urban water management," *Environ. Sci. Technol.,* vol. 51, no. 5, pp. 2538-2553, 2017.

[5] A. Gupta and K. D. Kulat, "A selective literature review on management techniques for water distribution system," *Water Resour. Manage.,* vol. 32, no. 10, pp. 3247-3269, 2018.

[6] B. B. Azevedo and T. A. Saurin, "Losses in Water Distribution Systems: A Complexity Theory Perspective," *Water Resour. Manage.,* vol. 32, pp. 2919-2936, 2018.

[7] E. Roshani and Y. Filion, "WDS leakage management through pressure control and pipes rehabilitation using an optimization approach," *Procedia Eng., vol*. 89, pp. 21-28, 2014.

[8] G. M. Lima, B. M. Brentan, and E. Luvizotto Jr., "Optimal Design of Water Supply Networks Using an Energy Recovery Approach," *Renewable Energy,* vol. 117, pp. 404–413, 2018.

[9] R. D. Jadhao and R. Gupta, "Calibration of water distribution network of the Ramnagar zone in Nagpur City using online pressure and flow data," *Appl. Water Sci.,* vol. 8, p. 29, 2018.

[10] A. Nafi, C. Werey, and P. Llerena, "Water pipe renewal using a multiobjective optimization approach," *J. Civ. Eng.,* vol. 35, no. 1, pp. 87-94, 2008.

[11] P. D. Rogers and N. S. Grigg, "Failure Assessment Modeling to Prioritize Water Pipe Renewal: Two Case Studies," *J. Infrastruct. Syst.,* vol. 15, no. 3, 2009. DOI: 10.1061/(ASCE)1076-0342.

[12] R. B. Rutger de Graaf, "Transforming Water Infrastructure by Linking Water Management and Urban Renewal in Rotterdam," *Technol. Forecast. Soc. Change,* vol. 77, no. 8, pp. 1282–1291, 2010.

[13] M. Fırat, C. Orhan, and S. Yılmaz, "Su İdarelerinin Su Kayıp Yönetim Performansının Analizi ve Temel Performans Gösterge Hesaplama Aracının Geliştirilmesi," *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi,* vol. 7, no. 1, pp. 75-88, 2021.

[14] M. Fırat, S. Yılmaz, A. Ateş, and Ö. Özdemir, "Determination of Economic Leakage Level with Optimization Algorithm in Water Distribution Systems," *Water Econ. Policy,* vol. 7, no. 3, p. 2150014, 2021. DOI: 10.1142/S2382624X21500144.

[15] R. Liemberger and M. Farley, "Developing Non-Revenue Water Reduction Strategy Part 1: Investigating and Assessing Water Losses," in Proc. *IWA 4th World Water Congr.* Exhib., Marrakech, Morocco, Sept. 19–24, 2004, pp. 1–10.

[16] V. Kanakoudis and K. Gonelas, "Non-Revenue Water Reduction Through Pressure Management in Kozani's Water Distribution Network: From Theory to Practice," *Water Treat,* vol. 57, no. 25, pp. 11436–11446, 2016.

[17] A. Francisque et al., "Water Mains Renewal Planning Framework for Small to Medium-Sized Water Utilities: A Life Cycle Cost Analysis Approach," *Urban Water J.,* vol. 14, no. 5, pp. 493–501, 2017.

[18] Erzurum Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü (ESKİ), 2024. [Online]. Available: https://www.eski.gov.tr/

[19] B. Çırağ, İ. Taşkolu, R. Acar, M. Fırat, and S. Şengül, "Arazi örtüsü/kullanımındaki değişim ile yağış ve sıcaklık değerlerindeki trend analizinin birlikte değerlendirilmesi: Erzurum ili örneği," in Proc. *XII. Ulusal Hidroloji Kongresi*, 2024, pp. 384-393.

[20] İller Bankası Anonim Şirketi (İLBANK), "İçme suyu tesisleri etüt, fizibilite ve projelerin hazırlanmasına ait teknik şartname," 2013. [Online]. Available: https://www.ilbank.gov.tr/storage/uploads/files/icmesuyu-etut-fizb-tekn-sart.pdf

[21] S. Kahraman and Ö. Ünsal, ArcGIS For Desktop Spatial Analiz Kitabı. *Esri Türkiye.* 2014.

[22] A. Charpentier and E. Gallic, "Kernel Density Estimation with Ripley's Circumferential Correction," *SSRN Electron.* J., 2014. https://doi.org/10.2139/ssrn.2514890

[23] B. Çırağ, M. Fırat, and Ö. Özdemir, "Yağmursuyu Drenaj Sistemlerinde Meydana Gelen Arızaların Sistem Özelliklerine ve Konumsal Değişimine Göre İncelenmesi," *in Proc. Int. Ecology Environ. Congr.,* Baku, Azerbaijan, May 1-2, 2023.

[24] T. Kucukpehlivan et al., "Determination of the impacts of urban-planning of the urban land area using GIS hotspot analysis," *Comput. Electron. Agric.,* vol. 210, p. 107935, 2023.

[25] M. M. Nistor and A. S. Nicula, "Application of GIS Technology for Tourism Flow Modelling in The United Kingdom," *Geographia Technica,* vol. 16, no. 1, 2021.

[26] B. D. Çulha and E. Turhan, "Kücük Ölçekli İçme Suyu Dağıtım Şebekesinin Nümerik Olarak Modellenmesinde Hidrolik Parametrelerin Analizi," *Osmaniye Korkut Ata Univ. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 5, no. 3, pp. 1293-1307, 2022. https://doi.org/10.47495/okufbed.1085227

[27] M. Fırat, S. Yılmaz, and C. Orhan, "Su kayıp yönetimi için temel hesaplama araçlarının geliştirilmesi ve temel su kayıp bileşenlerinin analizi," *Gümüşhane Univ. Fen Bilimleri Dergisi,* vol. 11, no. 2, pp. 405-416, 2021. https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.812340

[28] Y.E. Çoruhlu and S.S. Altaş, "İçme suyu altyapısının mekânsal yönetimi için örnek bir coğrafi bilgi sistemi tasarımı ve uygulaması: Trabzon Büyükşehir Belediyesi özel durum çalışması." *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 2024, 14.2: 816-849.

[29] İ. Alptekin, B. Kızılöz, and S. Engin. "İçme suyu dağıtım sistemlerinde meydana gelen arızaların analizi." *In International Marmara Sciences Congress*, pp. 454, 2021.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yazar Katkıları

F. Canyurt: Çalışma konsepti ve tasarım, veri toplama, verilerin analizi ve yorumlanması, taslağın oluşturulması. R. Acar: Çalışma konsepti ve tasarım, taslağın oluşturulması, revizyon. B. Çırağ: Çalışma konsepti ve tasarım, verilerin analizi ve yorumlanması, taslağın oluşturulması, revizyon.

Teşekkür

Bu makale Ferdi Canyurt'un yüksek lisans tezi kapsamında üretilmiştir. Yazarlar Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne teşekkür etmektedir.

Dicle University
Journal of Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/dumf
duje.dicle.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

Dicle Nehri Su Kalitesi Parametrelerinin Trend Analizi

Trend Analysis of Tigris River Water Quality Parameters

Mesut Ay[1*], Tamer Bağatur[2]

[1] Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, mesutay@artuklu.edu.tr
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0808-2947

[2] Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, tbagatur@dicle.edu.tr
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4243-3029

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 26 Mart 2025
Revizyon 11 Nisan 2025
Kabul 24 Nisan 2025
Online 30 Haziran 2025

Anahtar Kelimeler:

Su kalitesi, Trend analizi, Dicle Nehri.

ÖZ

Bu çalışma, Dicle Nehri'nde belirlenen beş farklı istasyondan alınan su kalite parametrelerinin zamansal değişimlerini inceleyerek, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi açısından önemli bulgular ortaya koymayı amaçlamaktadır. 2011-2020 yılları arasında dört farklı dönemde (Mart, Haziran, Eylül ve Aralık aylarında) alınan su numuneleri değerlendirilmiş, fiziksel, kimyasal ve biyolojik parametreler üzerinde istatistiksel trend analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada Mann-Kendall trend analizi, Sen'in Eğim Tahmincisi ve Şen (2012) trend analizi yöntemleri kullanılmıştır. Elde edilen bulgular, bazı su kalite parametrelerinde belirgin artış veya azalış eğilimleri olduğunu göstermektedir. Elektriksel iletkenlik (EC), toplam çözünmüş madde (TDS), kimyasal oksijen ihtiyacı (COD), nitrik azot (NO_3-N) ve orto fosfat (O-PO_4) gibi parametrelerde anlamlı artışlar tespit edilmiştir. Bu durum, tarımsal gübreleme, evsel ve endüstriyel atıkların su ekosistemine olan etkilerini ortaya koymaktadır. Çözünmüş oksijen (DO) seviyelerinde belirli bölgelerde azalma eğilimi görülmüş olup, bu durum organik kirliliğin artışına bağlı olarak oksijen tüketiminin arttığını göstermektedir. Trend analizleri sonucunda, özellikle tarımsal faaliyetlerin yoğun olduğu bölgelerde azot ve fosfat türevlerinde artış gözlemlenmiş, endüstriyel ve evsel atık deşarjlarının yoğun olduğu alanlarda ise çözünmüş oksijen ve ağır metal seviyelerinde belirgin değişimler tespit edilmiştir. pH seviyelerinde yıllar içinde hafif bir artış gözlemlenmiş olup, bu durum suyun alkalinitesindeki değişimi göstermektedir. Bu çalışma, Dicle Nehri'nin su kalitesinin zamanla değiştiğini ve kirlilik yüklerinin arttığını ortaya koyarak, su kaynaklarının korunması ve sürdürülebilir yönetimi için önleyici tedbirlerin alınması gerektiğini vurgulamaktadır. Tarımsal gübreleme uygulamalarının kontrol altına alınması, sanayi atık yönetimi stratejilerinin geliştirilmesi ve su kalitesi izleme sistemlerinin güçlendirilmesi, ekosistem sağlığının korunması açısından büyük önem taşımaktadır. Elde edilen bulguların, gelecekte yapılacak çalışmalar ve su yönetimi politikalarının oluşturulması açısından rehber niteliğinde olacağı düşünülmektedir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 26 March 2025
Received in revised form 11 April 2025
Accepted 24 April 2025
Available online 30 June 2025

Keywords:

Water quality, Trend analysis, Dicle River

DOI: 10.24012/dumf.1666051

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

This study aims to analyze the temporal variations of water quality parameters at five different stations along the Tigris River, providing crucial insights into the sustainable management of water resources. Water samples collected during four different periods (March, June, September, and December) between 2011 and 2020 were evaluated, and statistical trend analyses were conducted on physical, chemical, and biological parameters. Mann-Kendall trend analysis, Sen's Slope Estimator, and Şen (2012) trend analysis methods were applied to determine significant trends in water quality changes. The findings indicate notable increasing or decreasing trends in several water quality parameters. Significant increases were observed in electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), chemical oxygen demand (COD), nitrate nitrogen (NO_3-N), and orthophosphate (O-PO_4), suggesting the impacts of agricultural activities, domestic waste, and industrial discharges on the river's ecosystem. A decreasing trend in dissolved oxygen (DO) was detected in certain areas, indicating rising organic pollution and oxygen depletion. Trend analysis results revealed that nitrate and phosphate levels increased significantly in agricultural areas, while dissolved oxygen and heavy metal levels fluctuated in regions with intensive industrial and domestic waste discharge. Additionally, a slight increase in pH levels was observed over the years, indicating changes in the river's alkalinity. This study highlights the ongoing degradation of water quality in the Tigris River and emphasizes the need for preventive measures to protect and sustainably manage water resources. Controlling agricultural fertilizer applications, improving industrial waste management strategies, and strengthening water quality monitoring systems are crucial for preserving ecosystem health. The findings serve as a valuable reference for future research and water management policies.

1. Giriş

Su, yaşamın devamı ve ekosistemlerin dengesi açısından vazgeçilmez bir kaynaktır. Ancak dünya üzerindeki toplam su miktarının yalnızca %3'ü tatlı su kaynaklarından oluşmakta, bunun da sadece %1'lik bir bölümü doğrudan erişilebilir yüzey sularını kapsamaktadır [1]. Tatlı su kaynaklarının bu sınırlı erişilebilirliği, özellikle kurak ve yarı kurak iklim bölgelerinde su kaynaklarının korunmasını ve etkin yönetimini zorunlu kılmaktadır [2]. Artan nüfus, sanayileşme, tarımsal faaliyetler ve iklim değişikliği gibi küresel faktörler, su kaynakları üzerinde ciddi baskılar oluşturmaktadır [3,4]. Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde ise bu baskılar daha belirgin şekilde hissedilmektedir [5].

Son yıllarda, küresel ısınma ve iklim değişikliğine bağlı olarak yağış rejimlerinde görülen düzensizlikler, sıcaklık artışları ve hidrolojik döngüdeki bozulmalar, yüzey su kaynaklarının hem miktarında hem de kalitesinde önemli değişimlere neden olmuştur [6,7]. Tatlı su kaynakları yalnızca içme suyu temini için değil, aynı zamanda tarımsal sulama, sanayi kullanımı ve rekreasyonel amaçlar için de kritik öneme sahiptir. Ancak antropojenik faaliyetler sonucu oluşan kirlilik, bu kaynakların sağlığını tehdit etmekte ve sürdürülebilir kullanımını zorlaştırmaktadır [8,9].

Su kaynaklarında meydana gelen kirlilik; evsel atıklar, endüstriyel deşarjlar, tarımsal gübre ve pestisit kullanımı gibi çoklu kaynaklardan kaynaklanmakta ve özellikle nehir gibi yüzeysel su sistemlerinde kalite bozulmalarına yol açmaktadır [10]. Türkiye'de de yüzey sularının kalitesinin korunmasına yönelik çeşitli izleme çalışmaları ve yönetmelikler bulunmakta, bu kapsamda Devlet Su İşleri (DSİ) ve Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından periyodik su kalite izleme faaliyetleri yürütülmektedir [11].

Türkiye'nin en önemli nehir sistemlerinden biri olan Dicle Nehri, Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde yer almakta olup uzunluğu yaklaşık 1.150 km'dir. Türkiye sınırları içerisinde Batman, Diyarbakır ve Mardin gibi illerden geçtikten sonra Irak'a doğru akmaktadır. Dicle Nehri, bölgedeki içme suyu temini, tarımsal sulama, enerji üretimi gibi çok çeşitli kullanım alanlarına sahiptir [12]. Ancak, artan nüfus yoğunluğu, sanayi faaliyetleri, tarımsal üretimde kullanılan kimyasallar ve kontrolsüz atıksu deşarjları, Dicle Nehri'nin su kalitesinde önemli bozulmalara neden olmaktadır [13,14].

Su kaynaklarının mevcut durumunu anlamak ve geleceğe yönelik koruma stratejileri geliştirmek amacıyla su kalitesindeki değişimlerin uzun dönemli izlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla uygulanan trend analiz yöntemleri, su kalitesinde meydana gelen artış veya azalış eğilimlerinin belirlenmesi açısından güçlü araçlar sunmaktadır [15]. Mann-Kendall trend testi ve Sen'in Eğim Tahmincisi gibi non-parametrik istatistiksel yöntemler, çevresel veri setlerinde zamana bağlı değişimlerin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [16,17]. Ayrıca, Şen (2012) tarafından geliştirilen trend analizi yöntemi, özellikle ani değişimlerin ve kırılma noktalarının tespitinde etkili bir araç olarak literatürde yer edinmiştir [18].

Bu çalışma, Dicle Nehri'nde seçilen farklı gözlem noktalarındaki su kalitesi parametrelerinde yıllar içerisindeki değişim eğilimlerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulguların, bölgedeki su yönetimi stratejilerine bilimsel katkı sağlaması ve sürdürülebilir su kaynakları yönetimi için veri temeli oluşturması hedeflenmektedir.

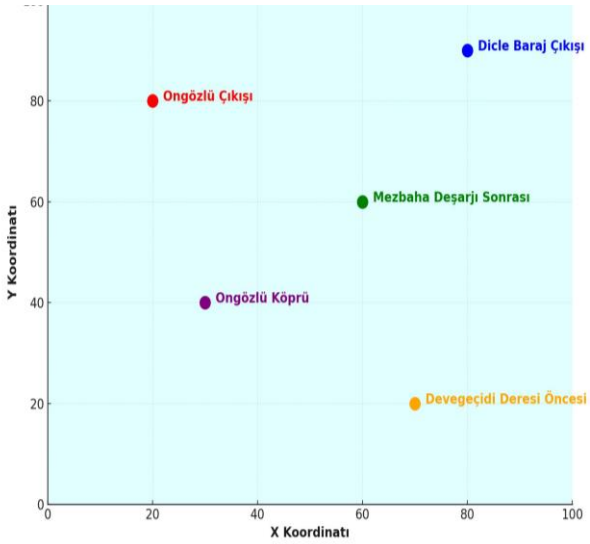
2. Materyal ve Metod

Bu çalışmada, Dicle Nehri'nin Diyarbakır il sınırları içinde farklı noktalardan alınan su numuneleri üzerinde gerçekleştirilen analizlerle, su kalitesinin uzun vadeli değişimlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında 2011-2020 yılları arasında, yılın dört farklı döneminde (Mart, Haziran, Eylül ve Aralık aylarında) alınan su numuneleri değerlendirilmiştir. Numunelerin toplandığı gözlem istasyonları arasında Ongözlü Çıkışı, Dicle Baraj Çıkışı, Dicle Nehri-Mezbaha Deşarjı Sonrası, Dicle Nehri-Ongözlü Köprü ve Devegeçidi Deresi-Dicle Nehri Öncesi gibi noktalar bulunmaktadır. Bu noktalar, su kalitesinin farklı etkiler altında nasıl değiştiğini anlamak için belirlenmiş olup, özellikle sanayi, evsel atıklar ve tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan kirleticilerin nehir üzerindeki etkilerini gözlemlemek açısından önem arz etmektedir.

Bu çalışmada, su kalite parametrelerinin zamana bağlı değişimlerini incelemek amacıyla Mann-Kendall trend testi uygulanmıştır. Mann-Kendall testi, parametrik olmayan bir yöntem olup, verilerde anlamlı bir artış veya azalış eğiliminin olup olmadığını belirlemek için kullanılmaktadır.

Analiz sonucunda elde edilen Tau (τ) katsayısı, eğilimin yönünü ve gücünü ifade etmektedir. Tau değeri pozitif ise ilgili parametrede artan bir eğilim, negatif ise azalan bir eğilim söz konusudur. Tau değeri sıfıra yaklaştıkça, ilgili değişken için anlamlı bir trendin bulunmadığı yorumu yapılmaktadır.

Ayrıca, test sonucunda elde edilen p-değeri, belirlenen eğilimin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını göstermektedir. Bu kapsamda, p-değeri 0.05'ten küçük ise eğilim %95 güven düzeyinde anlamlı kabul edilmekte; p-değeri 0.05'in üzerinde ise eğilim rastlantısal olarak değerlendirilmektedir. Bu testler aracılığıyla, 2011–2020 yılları arasında gözlemlenen su kalite parametrelerindeki değişimler yön ve anlamlılık bakımından değerlendirilmiştir.



Şekil 1. Dicle Nehri üzerinde gözlem yapılan istasyonların harita üzerindeki yaklaşık konumları.

Çalışma kapsamında incelenen su kalitesi parametreleri fiziksel, kimyasal ve biyolojik bileşenleri içermektedir. Fiziksel parametreler arasında su sıcaklığı, pH, elektriksel iletkenlik (EC) ve toplam çözünmüş madde (TDS) bulunmaktadır. Kimyasal analizlerde çözünmüş oksijen (DO), biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOD_5), kimyasal oksijen ihtiyacı (COD), klorür (Cl), nitrit azotu (NO_2-N), amonyum azotu (NH_4-N), nitrik azot (NO_3-N) ve orto fosfat (O-PO_4) gibi bileşenler değerlendirilmiştir. Ağır metaller ve iyonlar açısından ise demir (Fe), mangan (Mn), sodyum (Na), kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg) ve potasyum (K) parametreleri incelenmiştir. Bu parametrelerin belirlenmesinde kullanılan analiz yöntemleri uluslararası standartlara uygun olarak gerçekleştirilmiş olup, numune alma süreçleri TS EN ISO 5667-3 standardına uygun şekilde yürütülmüştür.

Verilerin istatistiksel olarak değerlendirilmesi ve uzun vadeli değişimlerin belirlenmesi amacıyla farklı trend analiz yöntemleri kullanılmıştır. Parametrik olmayan Mann-Kendall trend testi, zamana bağlı olarak su kalitesi parametrelerinde belirli bir artış veya azalış olup olmadığını tespit etmek için uygulanmıştır. Bu yöntemin yanı sıra Sen'in Eğim Tahmincisi, trendin büyüklüğünü ve yönünü belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Mann-Kendall testinin eksikliklerini gidermek ve daha detaylı sonuçlar elde etmek için Şen (2012) trend analizi yöntemi de çalışmaya dahil edilmiştir. Bu yöntemler, su kalitesindeki değişimlerin daha hassas bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Analiz edilen verilerin işlenmesi ve değerlendirilmesi için SPSS 26.0 ve MATLAB yazılımları kullanılmıştır. Grafiksel gösterimler ise Excel ve OriginPro 2021 programları yardımıyla hazırlanmıştır. Trend analizleri için istatistiksel anlamlılık seviyeleri $p<0.05$ olarak kabul edilmiş olup, elde edilen sonuçlar su kalitesindeki değişimlerin güvenilir bir şekilde yorumlanmasına katkı sağlamaktadır.

3. Trend Analizi

Bu çalışmada, Dicle Nehri'ndeki su kalitesindeki uzun vadeli değişimleri belirlemek amacıyla Mann-Kendall (MK) Trend Testi, Sen'in Eğim Tahmincisi (Sen's Slope Estimator) ve Şen (2012) Trend Analizi yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemler, zamana bağlı olarak su kalitesi parametrelerinde sistematik bir değişim olup olmadığını belirlemeye yardımcı olmuştur.

3. 1. Mann-Kendall (MK) Trend Testi

Mann-Kendall trend testi, bir zaman serisindeki eğilimleri belirlemek için kullanılan parametrik olmayan (non-parametric) bir yöntemdir. Bu test, zamana bağlı olarak istatistiksel olarak anlamlı bir artış veya azalış olup olmadığını belirlemek için uygulanmıştır.

Testin hesaplanması şu adımları içermektedir:

1. İki farklı zaman dilimindeki gözlemler (X_j, X_k) karşılaştırılır.

2. S istatistiği aşağıdaki formülle (1) hesaplanır:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^{n} sgn\,(x_j - x_k) \quad (1)$$

Burada, işaret fonksiyonu (sgn) şu şekilde (2) tanımlanır:

$$sgn(x_j - x_k) = \begin{cases} +1\ Eğer\ (x_j - x_k) > 0 \\ 0\ Eğer\ (x_j - x_k) = 0 \\ -1\ Eğer\ (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

3. Eğer veri sayısı büyükse (n>10), S istatistiği yaklaşık olarak normal dağılıma uyar ve Z skoru şu şekilde (3) hesaplanır:

$$Z = \frac{S}{\sqrt{Var\,(S)}} \quad (3)$$

Burada, t aynı değere sahip gözlemlerin frekansıdır.

Burada varyans (Var(S)), aşağıdaki formüle (4) göre hesaplanır:

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_t [t(t-1)(2t+5)]}{18} \quad (4)$$

4. Eğer ise, trend istatistiksel olarak anlamlı kabul edilir. Genellikle %95 güven aralığı için alınır.

3.2. Sen'in Eğim Tahmincisi (Sen's Slope Estimator)

Sen'in eğim tahmincisi, zaman serisinde belirlenen trendin yönü ve büyüklüğünü belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. Eğim (β) şu şekilde (5) hesaplanır:

$$\beta = Medyan\ (\frac{x_j - x_k}{j-k}) \quad (5)$$

Bu formülde:

- X_j ve X_k zaman serisindeki gözlem değerleridir.
- j ve k zaman dilimleridir.

3.3. Şen (2012) Trend Analizi

Şen (2012) yöntemi, zaman serisindeki ani değişimleri belirlemek için kullanılan bir yöntemdir ve klasik MK testine göre daha hassas sonuçlar verir. Bu analizde:

1. Zaman serisi önce "artan" ve "azalan" alt kümelere ayrılır.
2. Her alt kümede ayrı Mann-Kendall testi uygulanır.
3. Elde edilen sonuçlar birleştirilerek zaman serisinde hangi dönemde ne tür değişimler olduğu belirlenir.

Bu yöntem, özellikle iklim değişikliği ve çevresel faktörlerin neden olduğu ani değişimlerin analiz edilmesinde kullanılır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışma kapsamında, Dicle Nehri'nde belirlenen beş farklı noktadan alınan su numuneleri üzerinde gerçekleştirilen analizlerle, 2011-2020 yılları arasında su kalitesindeki değişimler incelenmiştir. Elde edilen veriler, fiziksel, kimyasal ve biyolojik parametrelerde zamansal dalgalanmaların olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle, sıcaklık, pH, elektriksel iletkenlik, çözünmüş oksijen ve besin elementleri gibi parametrelerde belirgin değişimler gözlemlenmiş olup, bu değişimlerin çevresel ve antropojenik faktörlere bağlı olduğu tespit edilmiştir.

Elde edilen sıcaklık verileri değerlendirildiğinde, yıllar içinde genel olarak artış eğilimi gözlenmiş, ancak bu değişimin istatistiksel olarak anlamlı olmadığı belirlenmiştir. Elektriksel iletkenlik (EC) değerlerinde mevsimsel dalgalanmalar gözlenmiş olup, yaz aylarında artış eğilimi göstermesi, buharlaşmanın ve su seviyesindeki düşüşün etkisini ortaya koymaktadır. Toplam çözünmüş madde (TDS) değerleri de benzer bir eğilim sergilemiş, özellikle yaz aylarında daha yüksek değerler elde edilmiştir. Çözünmüş oksijen (DO) miktarları, su sıcaklığı ile ters orantılı olarak değişmiş ve sıcaklık arttıkça DO seviyelerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOD_5) ve kimyasal oksijen ihtiyacı (COD) değerleri, su oluşturmaktadır. Bu nedenle, su kaynaklarının korunması ve sürdürülebilir yönetimi için etkin su kalitesi izleme programlarının uygulanması, su arıtma süreçlerinin iyileştirilmesi ve kirletici kaynakların kontrol altına alınması gerekmektedir.

Şekil 1 incelendiğinde, Dicle Nehri'nin Öngözlü Baraj Çıkışı istasyonundaki su kalitesi parametrelerinde yıllar içinde belirli eğilimlerin ortaya çıktığı görülmektedir. Çözünmüş oksijen seviyeleri yıllara bağlı olarak değişkenlik göstermiş, ancak genel olarak belirgin bir eğilim göstermemiştir. Elektriksel iletkenlik ve toplam çözünmüş madde değerlerinde mevsimsel dalgalanmalar tespit edilmiş, özellikle yaz aylarında bu parametrelerde artış eğilimi ekosistemindeki organik madde yükü hakkında bilgi vermektedir. Özellikle şehir merkezine yakın istasyonlarda bu parametrelerin yüksek olması, evsel ve endüstriyel atıkların suya karıştığını göstermektedir.

Kimyasal analiz sonuçları değerlendirildiğinde, klorür, nitrit azotu (NO_2-N), amonyum azotu (NH_4-N) ve nitrik azot (NO_3-N) gibi parametrelerde belirli dönemlerde artışlar olduğu tespit edilmiştir. Özellikle nitrat seviyelerinin belirli yıllarda artış göstermesi, tarımsal gübre kullanımının yüzey sularına karıştığını düşündürmektedir. Amonyum azotu seviyelerindeki değişimler ise biyolojik aktiviteler ve evsel atıkların varlığı ile ilişkilendirilmiştir. Orto fosfat ($O\text{-}PO_4$) miktarları, genellikle tarımsal faaliyetlerin yoğun olduğu bölgelerde yükselmiş ve bu durum, tarım alanlarından kaynaklanan yüzey akışının su kalitesine olan etkisini ortaya koymuştur.

Ağır metal ve iyon parametreleri açısından değerlendirildiğinde, demir (Fe) ve mangan (Mn) seviyelerinin bazı istasyonlarda referans sınırlarını aştığı belirlenmiştir. Özellikle sanayi atıklarının yoğun olduğu bölgelerde bu metallerin yüksek seviyelerde tespit edilmesi, endüstriyel faaliyetlerin su kirliliği üzerindeki etkisini desteklemektedir. Sodyum (Na), kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg) ve potasyum (K) gibi iyonların seviyelerinde yıllar içinde belirgin değişimler gözlenmiş, bu değişimlerin hem doğal jeolojik süreçlerden hem de insan faaliyetlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Trend analizleri incelendiğinde, Mann-Kendall trend testi sonuçlarına göre, bazı parametrelerde belirgin artış veya azalış eğilimleri tespit edilmiştir. Özellikle nitrat ve fosfat gibi parametrelerde artış eğilimleri gözlemlenmiş olup, bu durum tarımsal girdilerin su kalitesini olumsuz etkilediğini göstermektedir. Sen'in Eğim Tahmincisi sonuçları, belirlenen trendlerin yönünü ve büyüklüğünü ortaya koymuş, özellikle çözünmüş oksijen seviyelerindeki azalış eğilimleri su kalitesinde olumsuz bir değişim yaşandığını göstermiştir. Şen (2012) trend analizi yöntemi ile elde edilen sonuçlar da benzer bir eğilim sergilemiş, özellikle yaz aylarında belirli parametrelerde istatistiksel olarak anlamlı değişimler gözlemlenmiştir.

Elde edilen bulgular, Dicle Nehri'nde belirli bölgelerde su kalitesinin zamanla bozulduğunu ve bu değişimlerin özellikle insan faaliyetleri ile ilişkilendirilebileceğini göstermektedir. Tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan besin yükü artışı, sanayi ve evsel atıklardan kaynaklanan kimyasal ve biyolojik kirleticiler, su ekosisteminin sürdürülebilirliği açısından önemli tehditler

gözlemlenmiştir. Bu durum, su seviyelerindeki değişim ve buharlaşma oranlarının artmasıyla ilişkilendirilebilir.

Biyokimyasal oksijen ihtiyacı değerlerinde zamanla hafif bir düşüş eğilimi gözlemlenmiş olsa da bu değişim istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Kimyasal oksijen ihtiyacında ise belirgin bir artış eğilimi söz konusudur. Bu durum, sudaki organik ve inorganik kirlilik yükünün zaman içinde arttığını gösterebilir. Klorür seviyeleri yıllar içinde dalgalı bir seyir izlemiş, ancak istatistiksel olarak anlamlı bir artış ya da azalış eğilimi göstermemiştir.

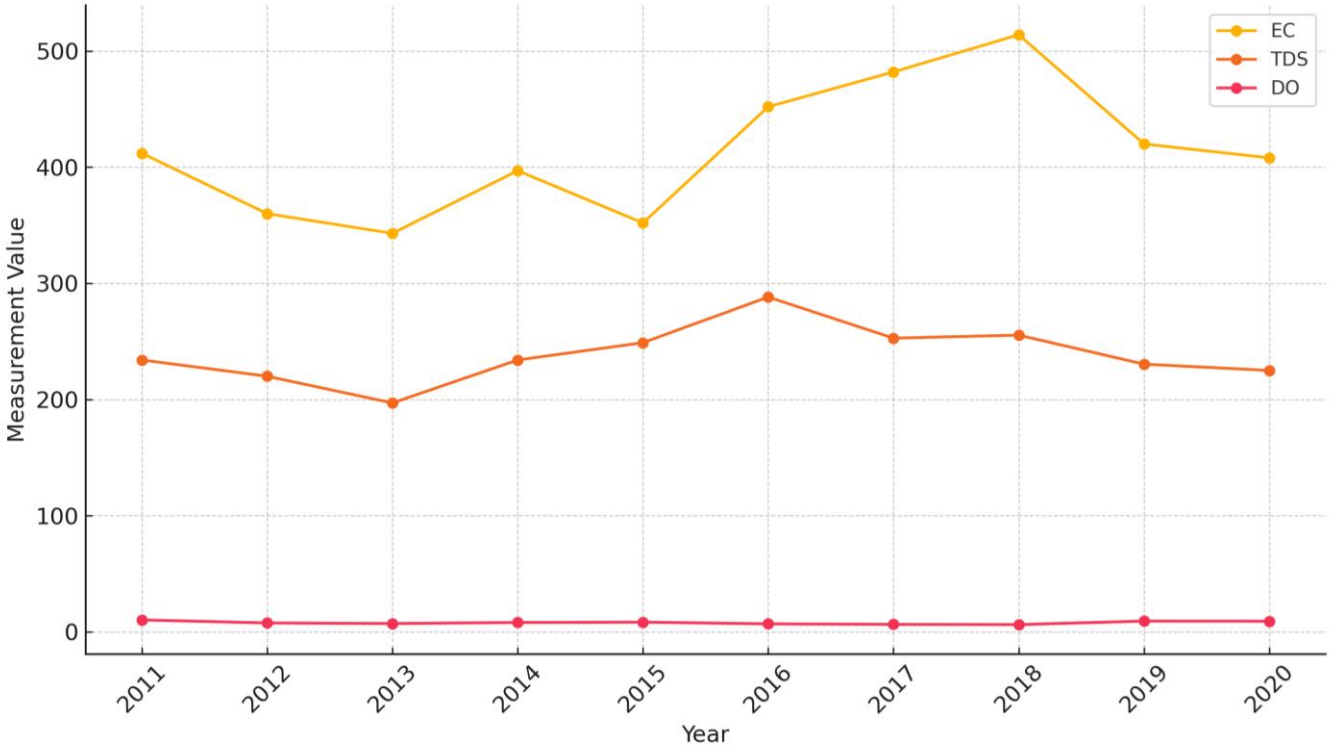
Besin elementleri açısından değerlendirildiğinde, nitrit azotu seviyelerinde anlamlı bir artış eğilimi tespit edilmiştir. Bu artış, tarımsal faaliyetlerden ve evsel atıklardan kaynaklanan kirleticilerin suya karışmasıyla ilişkilendirilebilir. Amonyum azotu seviyeleri zamanla

azalma eğilimi göstermiştir, bu durum biyolojik süreçlerin ve azot döngüsünün etkisini ortaya koymaktadır. Orto fosfat seviyeleri belirgin bir artış eğilimi gösterirken, bu durum deterjan kullanımı ve tarımsal gübrelerin yüzey akışıyla suya taşınmasıyla ilişkilendirilebilir.

Demir ve mangan seviyeleri, yıllara bağlı olarak değişiklik göstermiş, ancak belirli bir eğilim sergilememiştir. Bununla birlikte, sodyum seviyelerinin istatistiksel olarak anlamlı bir artış eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir. Sodyum seviyelerindeki bu artış, sanayi ve tarımsal sulama uygulamalarının etkisiyle ilişkilendirilebilir. Kalsiyum ve magnezyum seviyelerinde zamanla belirgin bir değişim gözlemlenmemiştir.

Nitrik azot seviyelerinde kayda değer bir artış eğilimi belirlenmiştir. Bu artış, tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan nitrat yükünün nehir suyuna taşındığını göstermektedir. Nitrat seviyelerindeki artış, su ekosisteminde ötrofikasyon riskini artırarak ekolojik dengeleri olumsuz etkileyebilir.

Tablo 1.Öngözlü Baraj çıkışı trend analizi



Genel olarak değerlendirildiğinde, belirli su kalite parametrelerinde istatistiksel olarak anlamlı artış eğilimleri tespit edilmiştir. Özellikle tarımsal ve evsel atıklardan kaynaklanan kirleticilerin zaman içinde arttığı görülmektedir. Bu durum, su kaynaklarının korunması ve sürdürülebilir su yönetimi politikalarının hayata geçirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Nehir ekosisteminin korunabilmesi için atık su arıtma süreçlerinin iyileştirilmesi ve kirletici kaynakların kontrol altına alınması büyük önem taşımaktadır

Şekil 2'de yer alan analiz sonuçları incelendiğinde, su kalitesi parametrelerinde belirgin değişimler gözlemlenmiştir. Biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOD_5) seviyelerinde zaman içinde hafif bir artış eğilimi gözlemlenmiş, ancak bu eğilim istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Kimyasal oksijen ihtiyacı (COD) değerleri ise belirli yıllarda artış göstermiş, ancak istatistiksel olarak anlamlı bir eğilim tespit edilmemiştir. Bu durum, organik madde yükünün yıllar içinde değişkenlik gösterdiğini ve su ekosisteminin biyolojik olarak farklı dönemlerde farklı tepkiler verdiğini düşündürmektedir.

Kalsiyum (Ca) seviyeleri zaman içinde dalgalanmalar göstermiş olup, belirli yıllarda artış eğilimi tespit edilmiştir. Ancak bu değişimler istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Çözünmüş oksijen (DO) seviyeleri incelendiğinde, belirli dönemlerde azalma eğilimi gösterdiği ancak genel olarak stabil kaldığı görülmektedir. Bu, suyun oksijen içeriğinin mevsimsel ve çevresel faktörlerden etkilendiğini göstermektedir.

Elektriksel iletkenlik (EC) ve toplam çözünmüş madde (TDS) seviyeleri zaman içinde artış eğilimi göstermiştir. Tau değeri pozitif olup, bu eğilim özellikle sanayi ve tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan çözünmüş iyon miktarındaki artış ile ilişkilendirilebilir. Elektriksel iletkenlikteki artış eğilimi suya karışan minerallerin ve çözünmüş maddelerin zaman içinde arttığını düşündürmektedir.

Demir (Fe) seviyelerinde anlamlı bir değişim gözlemlenmemiştir. Ancak, potasyum (K) seviyelerinin yıllar içinde istikrarlı bir artış gösterdiği görülmektedir. Magnezyum (Mg) seviyelerinde de benzer bir artış eğilimi gözlemlenmiştir. Bu değişimler, su kaynaklarının mineral içeriğinin zamanla değiştiğini ve dış etkenlerden etkilendiğini göstermektedir.

Nitrit azotu (NO_2-N) seviyelerinde artış eğilimi belirgin şekilde gözlemlenmiş olup, bu durum tarımsal gübreleme ve evsel atıkların yüzey sularına karışmasıyla ilişkilendirilebilir. Nitrik azot (NO_3-N) seviyelerinde de artış eğilimi belirlenmiş, bu durum tarımsal faaliyetlerin etkisini destekleyen bir bulgu olarak değerlendirilmektedir. Fosfat (O-PO_4) seviyelerinde de benzer şekilde bir artış gözlemlenmiş olup, deterjan kullanımı ve tarımsal gübrelerin yüzey akışı ile nehre taşındığını düşündürmektedir.

Sıcaklık (T) değerleri zaman içinde belirgin bir artış eğilimi göstermemiştir, ancak belirli yıllarda dalgalanmalar olduğu görülmektedir. pH seviyeleri yıllar içinde değişkenlik göstermiş olup, genel olarak hafif bir artış eğilimi sergilemiştir. Bu durum, suyun alkalinitesinin zamanla değiştiğini ve dış çevresel faktörlerden etkilendiğini düşündürmektedir.

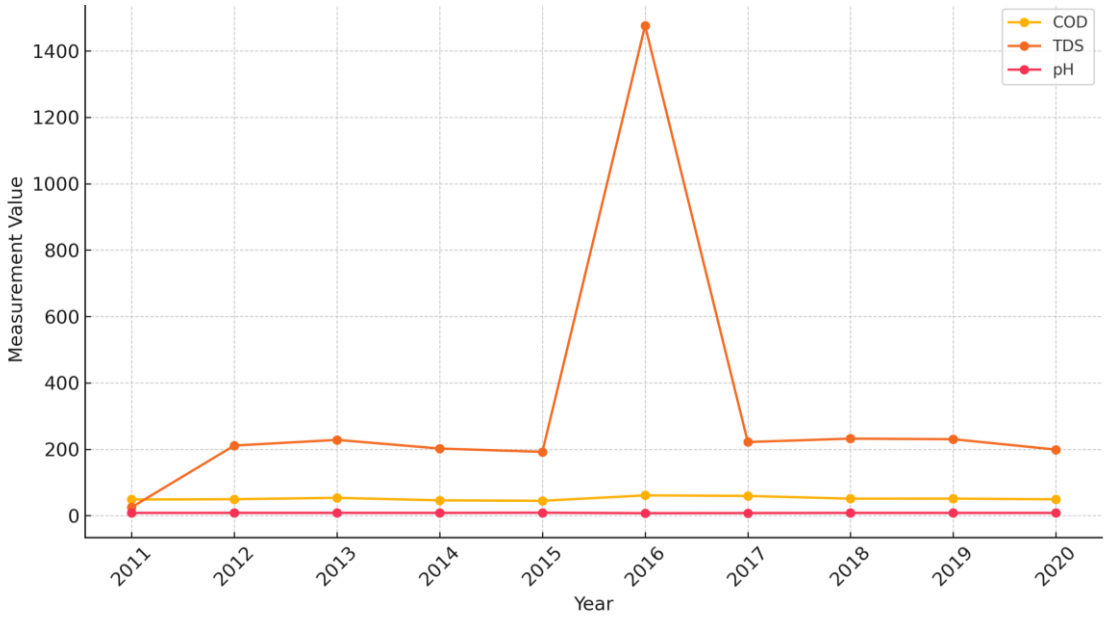
Tablo 2. İncelenen su kalitesi parametrelerinin olası kirletici kaynaklara göre sınıflandırılması ve gözlemlenen eğilimleri.

Parametre	Olası Kaynak/Etkileyen Faktörler	Gözlemlenen Değişim Eğilimi
NO_2-N (Nitrit Azotu)	Evsel atık suları, hayvansal atıklar, tarımsal gübre kalıntıları	Belirgin artış
NO_3-N (Nitrat Azotu)	Tarımsal faaliyetler (nitrat içeren gübreler), yüzey akışı	Artış
O-PO_4 (Fosfat)	Deterjan kullanımı, tarımsal fosfatlı gübreler, evsel atık suyu	Artış
NH_4-N (Amonyum Azotu)	Hayvansal atıklar, evsel kanalizasyon, yetersiz biyolojik arıtma	Artış
BOD_5	Organik madde yükü (evsel ve tarımsal kaynaklı)	Artış/Değişken
COD	Kimyasal kirlilik, deterjanlar, sanayi atıkları	Artış
Cl (Klorür)	Evsel atıklar, deterjanlar, kanalize yüzey akışı	Değişken (bölgeye göre)
TDS / EC	Toplam çözünmüş madde, genelde tüm bu kirleticilerin sonucu	Artış

Genel olarak değerlendirildiğinde, nitrit azotu, nitrik azot, orto fosfat ve toplam çözünmüş madde gibi parametrelerde artış eğilimleri belirgin hale gelmiş, bu durum özellikle tarımsal faaliyetler ve evsel atıkların su kalitesi üzerindeki etkisini ortaya koymuştur. Elektriksel iletkenlik ve toplam çözünmüş madde seviyelerindeki artışlar, su kaynaklarının mineral ve iyon içeriğinde değişikliklerin yaşandığını göstermektedir. Su kaynaklarının korunması ve sürdürülebilir yönetimi açısından bu eğilimlerin izlenmesi ve kontrol altına alınması büyük önem taşımaktadır.

Tablo 2'de yer alan analiz sonuçları incelendiğinde, su kalitesi parametrelerinde belirgin değişimler gözlemlenmiştir. Biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOD_5) seviyelerinde zaman içinde hafif bir artış eğilimi gözlemlenmiş, ancak bu eğilim istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Kimyasal oksijen ihtiyacı (COD) değerleri ise belirli yıllarda artış göstermiş, ancak istatistiksel olarak anlamlı bir eğilim tespit edilmemiştir. Bu durum, organik madde yükünün yıllar içinde değişkenlik gösterdiğini ve su ekosisteminin biyolojik olarak farklı dönemlerde farklı tepkiler verdiğini düşündürmektedir.

Tablo 3. Dicle baraj çıkışı trend analizi



Kalsiyum (Ca) seviyeleri zaman içinde dalgalanmalar göstermiş olup, belirli yıllarda artış eğilimi tespit edilmiştir. Ancak bu değişimler istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Çözünmüş oksijen (DO) seviyeleri incelendiğinde, belirli dönemlerde azalma eğilimi gösterdiği ancak genel olarak stabil kaldığı görülmektedir. Bu, suyun oksijen içeriğinin mevsimsel ve çevresel faktörlerden etkilendiğini göstermektedir.

Elektriksel iletkenlik (EC) ve toplam çözünmüş madde (TDS) seviyeleri zaman içinde artış eğilimi göstermiştir. Tau değeri pozitif olup, bu eğilim özellikle sanayi ve tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan çözünmüş iyon miktarındaki artış ile ilişkilendirilebilir. Elektriksel iletkenlikteki artış eğilimi suya karışan minerallerin ve çözünmüş maddelerin zaman içinde arttığını düşündürmektedir.

Demir (Fe) seviyelerinde anlamlı bir değişim gözlemlenmemiştir. Ancak, potasyum (K) seviyelerinin yıllar içinde istikrarlı bir artış gösterdiği görülmektedir. Magnezyum (Mg) seviyelerinde de benzer bir artış eğilimi gözlemlenmiştir. Bu değişimler, su kaynaklarının mineral içeriğinin zamanla değiştiğini ve dış etkenlerden etkilendiğini göstermektedir.

Nitrit azotu (NO_2-N) seviyelerinde artış eğilimi belirgin şekilde gözlemlenmiş olup, bu durum tarımsal gübreleme ve evsel atıkların yüzey sularına karışmasıyla ilişkilendirilebilir. Nitrik azot (NO_3-N) seviyelerinde de artış eğilimi belirlenmiş, bu durum tarımsal faaliyetlerin etkisini destekleyen bir bulgu olarak değerlendirilmektedir. Fosfat (O-PO_4) seviyelerinde de benzer şekilde bir artış gözlemlenmiş olup, deterjan kullanımı ve tarımsal

Kalsiyum (Ca) seviyeleri yıllar içinde dalgalanmalar göstermiş, ancak genel olarak istatistiksel olarak anlamlı bir eğilim tespit edilmemiştir. Çözünmüş oksijen (DO) seviyelerinde belirli dönemlerde azalma eğilimi gözlenmiştir. Tau değeri negatif olup, çözünmüş oksijen gübrelerin yüzey akışı ile nehre taşındığını düşündürmektedir.

Sıcaklık (T) değerleri zaman içinde belirgin bir artış eğilimi göstermemiştir, ancak belirli yıllarda dalgalanmalar olduğu görülmektedir. pH seviyeleri yıllar içinde değişkenlik göstermiş olup, genel olarak hafif bir artış eğilimi sergilemiştir. Bu durum, suyun alkalinitesinin zamanla değiştiğini ve dış çevresel faktörlerden etkilendiğini düşündürmektedir.

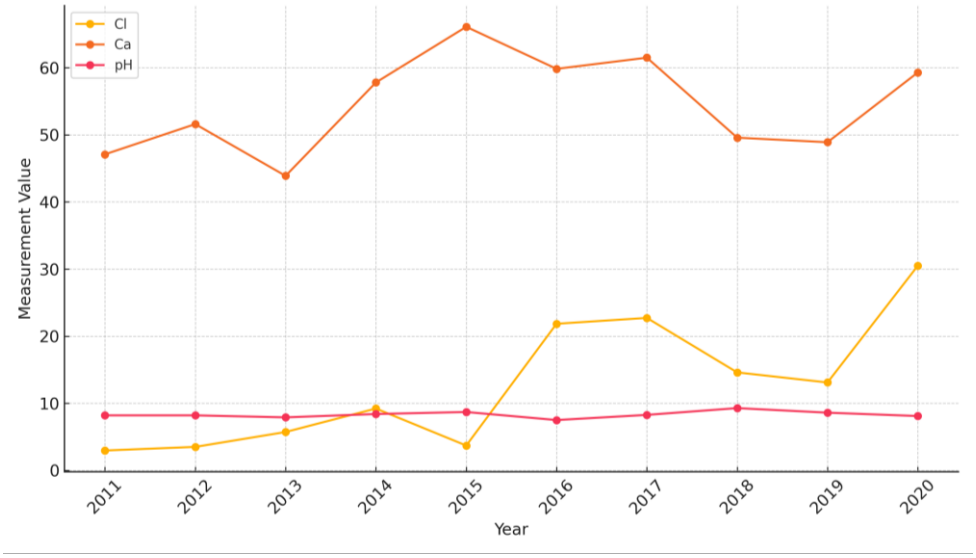
Genel olarak değerlendirildiğinde, nitrit azotu, nitrik azot, orto fosfat ve toplam çözünmüş madde gibi parametrelerde artış eğilimleri belirgin hale gelmiş, bu durum özellikle tarımsal faaliyetler ve evsel atıkların su kalitesi üzerindeki etkisini ortaya koymuştur. Elektriksel iletkenlik ve toplam çözünmüş madde seviyelerindeki artışlar, su kaynaklarının mineral ve iyon içeriğinde değişikliklerin yaşandığını göstermektedir. Su kaynaklarının korunması ve sürdürülebilir yönetimi açısından bu eğilimlerin izlenmesi ve kontrol altına alınması büyük önem taşımaktadır.

Tablo 3'te yer alan trend analizi sonuçları incelendiğinde, belirli su kalitesi parametrelerinde anlamlı değişimler olduğu görülmektedir.

Biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOD_5) değerlerinde hafif bir artış eğilimi gözlemlenmiş, ancak p-değeri istatistiksel olarak anlamlı bir değişim göstermemektedir. Kimyasal oksijen ihtiyacı (COD) değerlerinde belirgin bir artış gözlenmiş olup, organik ve inorganik kirleticilerin zamanla suya daha fazla karıştığını düşündürmektedir. Ancak, p-değeri istatistiksel anlamlılık sınırında yer aldığından bu artışın kesin olarak kirlilikle ilişkilendirilmesi için daha detaylı çalışmalar gereklidir.

seviyelerinin zaman içinde düştüğünü göstermektedir. Bu durum, organik kirlilik yükünün artmasıyla su içerisindeki biyolojik süreçlerin oksijen tüketimini artırdığına işaret edebilir.

Tablo 4. Dicle Nehri-Mezbaha trend analizi



Elektriksel iletkenlik (EC) değerlerinde belirli yıllarda artış eğilimi gözlemlense de, istatistiksel olarak anlamlı bir değişim tespit edilmemiştir. Demir (Fe) seviyelerinde belirli dalgalanmalar gözlenmiş, ancak genel olarak düşüş eğiliminde olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, potasyum (K) seviyelerinin yıllar içinde anlamlı bir artış eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. Sodyum (Na) seviyeleri de zamanla artış göstermiş olup, bu durum tarımsal ve evsel atıkların suya karıştığını göstermektedir.

Magnezyum (Mg) seviyelerinde zamanla artış eğilimi görülmüş, ancak istatistiksel olarak anlamlı bir değişim tespit edilmemiştir. Mangan (Mn) seviyeleri yıllar içinde dalgalanmalar göstermiş olup, istatistiksel olarak anlamlı bir eğilim bulunmamaktadır. Amonyum azotu (NH_4-N) seviyelerinde dalgalanmalar görülmüş, ancak zamanla belirgin bir eğilim tespit edilmemiştir. Nitrit azotu (NO_2-N) seviyelerinde zaman içinde belirgin bir artış eğilimi gözlemlenmiş olup, p-değeri bu artışın istatistiksel olarak anlamlı olmadığını göstermektedir.

Nitrik azot (NO_3-N) seviyelerinde belirgin bir artış eğilimi tespit edilmiştir. Bu durum, tarımsal gübreleme ve yüzey akışı nedeniyle nehir suyuna nitrat yükünün arttığını düşündürmektedir. Orto fosfat (O-PO_4) seviyelerinde artış eğilimi gözlenmiş olup, bu durum deterjan ve gübre kullanımına bağlı olarak yüzey sularına karışan fosfat seviyelerindeki yükselişi göstermektedir.

Sıcaklık (T) değerlerinde zaman içinde belirgin bir değişim gözlemlenmemiştir. Toplam çözünmüş madde (TDS) seviyeleri ise yıllar içinde belirgin bir artış eğilimi göstermiştir. pH seviyeleri yıllar içinde hafif bir artış eğilimi sergilemiş olup, istatistiksel olarak anlamlı bir değişim göstermemektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, nitrik azot, sodyum, potasyum ve toplam çözünmüş madde gibi parametrelerde Demir (Fe) seviyelerinde belirgin bir artış eğilimi gözlemlenmiş olup, özellikle belirli yıllarda yüksek seviyelere ulaştığı görülmektedir. Potasyum (K) seviyelerinde yıllar içinde hafif bir artış eğilimi görülmüş, ancak istatistiksel olarak anlamlı bir değişim tespit edilmemiştir. Magnezyum (Mg) seviyelerinde belirli belirgin artış eğilimleri tespit edilmiştir. Bu durum, su kalitesinin zamanla değiştiğini ve özellikle tarımsal ve evsel kaynaklı kirliliğin nehir ekosistemini etkileyebileceğini göstermektedir. Su kaynaklarının sürdürülebilirliği açısından bu değişimlerin düzenli olarak izlenmesi ve kirletici kaynakların kontrol edilmesi gerekmektedir.

Şekil 4'te yer alan trend analizi sonuçları incelendiğinde, belirli su kalitesi parametrelerinde anlamlı değişimler gözlemlenmiştir.

Biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOD_5) değerlerinde hafif bir artış eğilimi görülse de, p-değeri istatistiksel olarak anlamlı bir değişim göstermemektedir. Bu durum, organik kirlilik yükünün zaman içinde belirli dalgalanmalar gösterdiğini ancak anlamlı bir artış trendi sergilemediğini göstermektedir. Kimyasal oksijen ihtiyacı (COD) değerlerinde de benzer bir durum söz konusudur.

Kalsiyum (Ca) seviyelerinde zamanla belirli dalgalanmalar gözlenmiş, ancak istatistiksel olarak anlamlı bir değişim tespit edilmemiştir. Çözünmüş oksijen (DO) seviyelerinde belirli yıllarda düşüş eğilimi gözlemlenmiş olup, bu durum su içerisindeki biyolojik süreçlerin ve kirlilik yükünün oksijen seviyeleri üzerindeki etkisini göstermektedir. Ancak p-değeri, bu eğilimin istatistiksel olarak anlamlı olmadığını ortaya koymaktadır.

Elektriksel iletkenlik (EC) değerlerinde zaman içinde artış eğilimi görülmekte olup, tau değeri pozitif olarak hesaplanmıştır. Bu artış eğilimi, sanayi ve tarımsal faaliyetlerin suya karışan iyon miktarını artırmasıyla ilişkilendirilebilir. Bununla birlikte, toplam çözünmüş madde (TDS) seviyeleri de benzer şekilde artış göstermektedir. Bu durum, suya karışan çözünmüş iyonların zaman içinde arttığını ve su kalitesinde değişikliklere neden olduğunu düşündürmektedir.

dalgalanmalar tespit edilse de anlamlı bir trend belirlenmemiştir.

Tablo 5. Dicle Nehri-Öngözlü Köprü trend analizi

Mangan (Mn) seviyelerinde belirgin bir artış eğilimi gözlemlenmiştir. Amonyum azotu (NH_4-N) seviyelerinde yıllara bağlı değişimler görülmekle birlikte, istatistiksel olarak anlamlı bir artış veya azalış eğilimi tespit edilmemiştir. Nitrit azotu (NO_2-N) seviyelerinde dalgalanmalar gözlemlenmiş olup, belirgin bir trend oluşmadığı görülmektedir.

Nitrik azot (NO_3-N) seviyelerinde artış eğilimi gözlemlenmiş olup, bu durum tarımsal faaliyetlerin ve gübre kullanımının yüzey sularına karışmasıyla ilişkilendirilebilir. Orto fosfat (O-PO_4) seviyelerinde de zaman içinde hafif bir artış eğilimi gözlemlenmiştir.

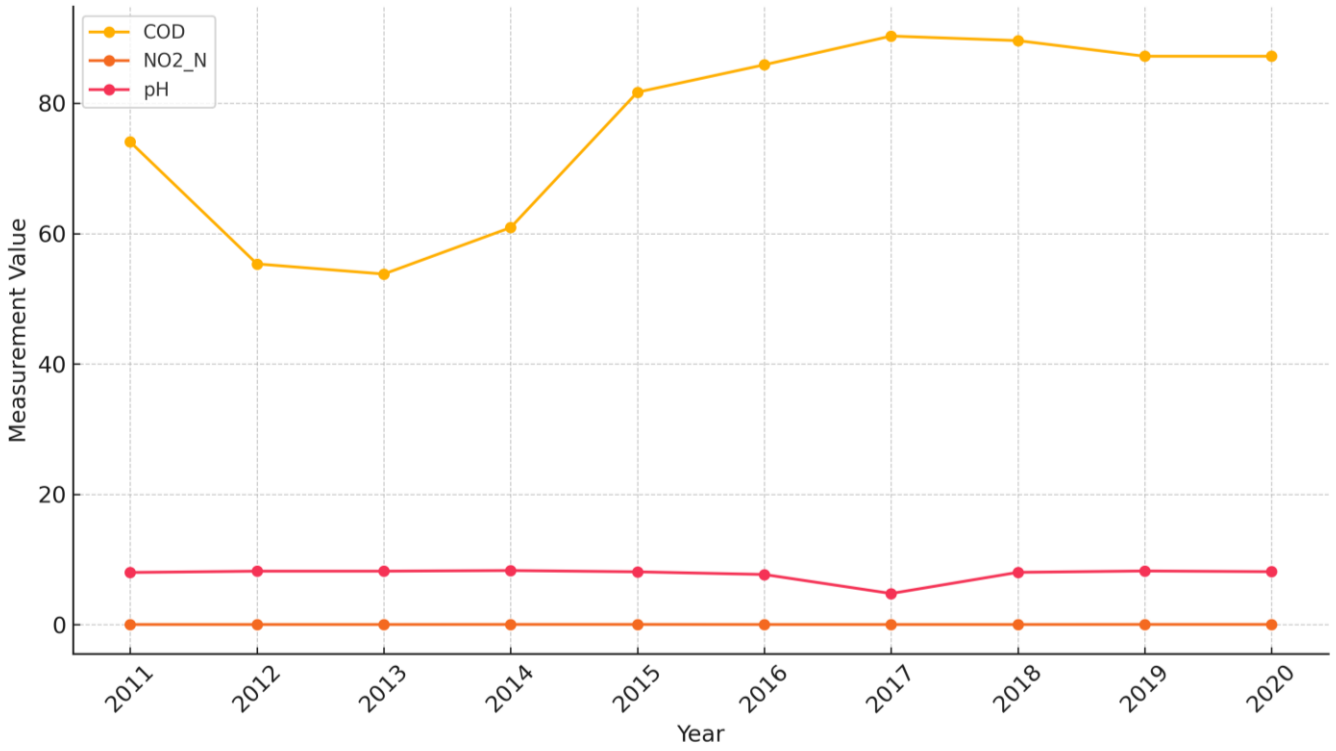
Sıcaklık (T) değerleri belirli yıllarda artış gösterse de istatistiksel olarak anlamlı bir değişim eğilimi göstermemektedir. Toplam çözünmüş madde (TDS) seviyeleri zamanla artış göstermiş olup, p-değeri bu eğilimin istatistiksel olarak anlamlı olabileceğini düşündürmektedir. pH seviyelerinde ise zamanla belirgin bir artış eğilimi gözlemlenmiştir ve bu eğilim istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Bu durum, suyun alkalinitesinin zamanla değiştiğini ve dış etkenlerden etkilendiğini göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, özellikle **elektriksel iletkenlik (EC), toplam çözünmüş madde (TDS), demir (Fe), nitrik azot (NO_3-N) ve pH** gibi parametrelerde artış eğilimleri belirgin hale gelmiştir. Bu değişimler, su kalitesinin zaman içinde farklı kaynaklardan gelen kirlilik yükleriyle etkilendiğini göstermektedir. Su kaynaklarının korunması ve sürdürülebilir yönetimi açısından bu değişimlerin düzenli olarak izlenmesi ve kirletici kaynakların kontrol edilmesi büyük önem taşımaktadır.

Şekil 5.'te sunulan trend analizi sonuçları incelendiğinde, Dicle Nehri'nde belirlenen su kalitesi parametrelerinde yıllar içinde belirli değişimler meydana geldiği görülmektedir.

Biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOD_5) seviyelerinde zaman içinde hafif bir azalma eğilimi gözlemlenmiştir. Ancak, p-değeri bu değişimin istatistiksel olarak anlamlı olmadığını göstermektedir. Kimyasal oksijen ihtiyacı (COD) seviyelerinde belirgin bir artış eğilimi tespit edilmiştir ve p-değeri bu değişimin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. COD seviyelerindeki bu artış, organik kirleticilerin zaman içinde su ekosistemine daha fazla karıştığını göstermektedir.

Tablo 6. Devegeçidi-Dicle trend analizi



Kalsiyum (Ca) seviyelerinde belirli dalgalanmalar gözlemlenmiş, ancak genel olarak anlamlı bir değişim eğilimi belirlenmemiştir. Çözünmüş oksijen (DO) seviyelerinde dalgalanmalar gözlemlenmiş olup, özellikle son yıllarda belirgin bir düşüş eğilimi olduğu görülmektedir. Tau değeri negatif olup, çözünmüş oksijen seviyelerinin zaman içinde azaldığını göstermektedir. Bu durum, organik kirliliğin artması ve biyolojik süreçlerin su içerisindeki oksijen tüketimini artırmasıyla ilişkilendirilebilir.

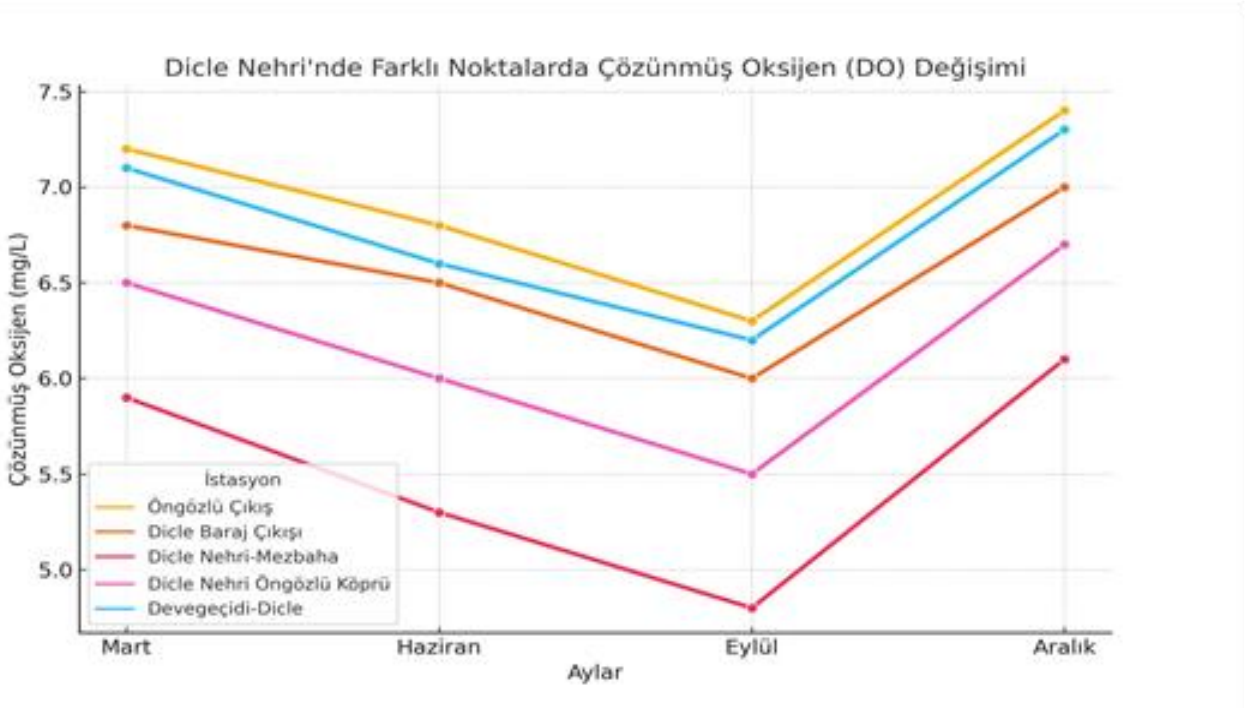
Elektriksel iletkenlik (EC) seviyeleri yıllar içinde artış göstermiştir. Tau değeri pozitif olup, p-değeri bu artış eğiliminin anlamlı olabileceğini göstermektedir. EC seviyelerindeki artış, sanayi ve tarımsal faaliyetlerin suya karışan çözünmüş iyon miktarını artırmasıyla ilişkilendirilebilir. Benzer şekilde, toplam çözünmüş madde (TDS) seviyelerinde de artış eğilimi gözlemlenmiştir. TDS seviyelerinin zamanla artması, suyun içerdiği çözünmüş iyonların arttığını ve su kalitesinde bozulmaya yol açabileceğini göstermektedir.

Demir (Fe) seviyelerinde belirli yıllarda dalgalanmalar görülmekle birlikte, genel olarak artış eğilimi gözlemlenmiştir. Potasyum (K) seviyeleri belirgin bir trend göstermemekle birlikte, yıllar içinde hafif dalgalanmalar yaşamıştır. Magnezyum (Mg) seviyelerinde de zamanla belirgin bir artış eğilimi gözlenmiş olup, p-değeri bu değişimin istatistiksel olarak anlamlı olabileceğini göstermektedir.

Mangan (Mn) seviyeleri yıllar içinde dalgalanmalar göstermiş, ancak istatistiksel olarak anlamlı bir artış trendi bulunmamaktadır. Amonyum azotu (NH_4-N) seviyelerinde belirli dönemlerde artış gözlemlenmiş olup, bu durum tarımsal ve evsel atıkların suya karışmasıyla ilişkilendirilebilir. Ancak p-değeri, bu değişimin anlamlı olmadığını göstermektedir.

Nitrit azotu (NO_2-N) seviyelerinde dalgalanmalar görülmekle birlikte, belirgin bir trend gözlenmemektedir. Nitrik azot (NO_3-N) seviyelerinde ise belirgin bir artış eğilimi tespit edilmiştir ve p-değeri bu değişimin istatistiksel olarak anlamlı olabileceğini göstermektedir. Bu durum, tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan nitrat yükünün zaman içinde arttığını düşündürmektedir. Orto fosfat (O-PO_4) seviyelerinde de zaman içinde artış gözlemlenmiş olup, p-değeri bu değişimin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. Fosfat seviyelerindeki artış, deterjan kullanımı ve gübreleme gibi insan faaliyetlerinin yüzey sularına etkisini göstermektedir.

Sıcaklık (T) seviyeleri belirli yıllarda dalgalanmalar göstermiş olup, istatistiksel olarak anlamlı bir eğilim belirlenmemiştir. pH seviyelerinde hafif bir artış eğilimi görülmüş olup, p-değeri bu değişimin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. Bu durum, suyun alkalinitesinin zamanla arttığını ve dış etkenlerden etkilendiğini düşündürmektedir.



Şekil 2. Dicle Nehri'nde Çözünmüş Oksijen (DO) Değişimi

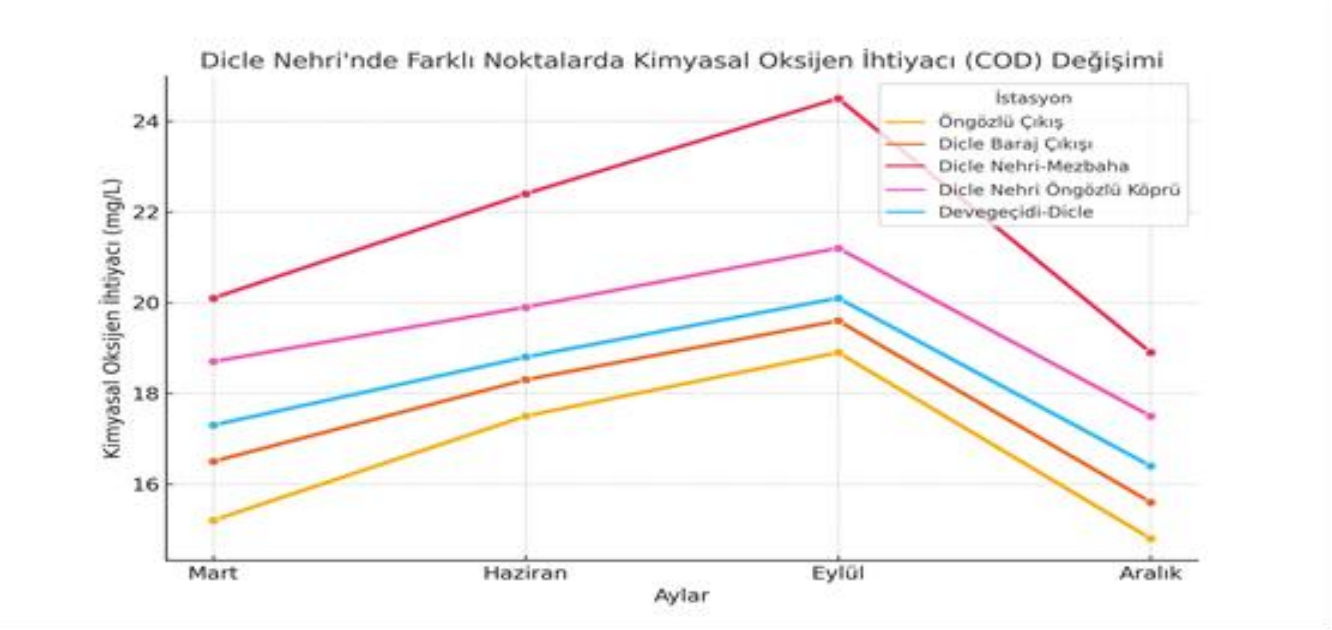
Genel olarak değerlendirildiğinde, elektriksel iletkenlik (EC), toplam çözünmüş madde (TDS), kimyasal oksijen ihtiyacı (COD), nitrik azot (NO_3-N) ve orto fosfat (O-PO_4) seviyelerinde anlamlı artış eğilimleri gözlemlenmiştir. Bu değişimler, özellikle tarımsal ve sanayi kaynaklı kirliliğin su kalitesi üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. Su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi açısından, bu parametrelerdeki artışın kontrol edilmesi ve su kalitesinin düzenli olarak izlenmesi gerekmektedir.

Dicle Nehri'ndeki farklı istasyonlarda çözünmüş oksijen (DO) seviyelerinin zamansal değişimi, su kalitesi açısından kritik bir gösterge olarak değerlendirilmiştir. Yapılan analizler, DO seviyelerinin genel olarak ilkbahar ve kış aylarında yüksek, yaz aylarında ise düşük olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle Eylül ayında düşüş eğilimi gözlemlenmiş olup, bu durum sıcaklık artışına bağlı olarak suyun oksijen tutma kapasitesinin azalması ve organik yük birikimi nedeniyle biyolojik oksijen tüketiminin artması ile ilişkilendirilebilir. Dicle Nehri-Mezbaha istasyonu en düşük çözünmüş oksijen seviyelerine sahip olup, bu bölgedeki endüstriyel ve evsel atık girişlerinin oksijen tüketimini artırdığı düşünülmektedir. Sonuçlar, özellikle sıcaklık değişimlerinin ve antropojenik baskının su ekosistemi üzerinde önemli etkiler oluşturduğunu göstermektedir. Su kalitesinin korunabilmesi için, atık su yönetim stratejilerinin geliştirilmesi ve ekosistem sağlığını destekleyecek önlemlerin alınması gerekmektedir.

Dicle Nehri'nde farklı istasyonlardan elde edilen kimyasal oksijen ihtiyacı (COD) verileri, suyun organik ve inorganik kirlilik yükünü değerlendirmek için incelenmiştir. Analizler, COD seviyelerinin yaz aylarında artış gösterdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle Dicle Nehri-Mezbaha istasyonu diğer bölgelere kıyasla en yüksek COD seviyelerine sahip olup, burada endüstriyel ve evsel atık girişinin daha yoğun olduğu düşünülmektedir. Mart ve Aralık aylarında COD seviyelerinde belirgin bir düşüş gözlemlenmiştir, bu durum ise yağış rejiminin etkisiyle kirletici maddelerin seyreltildiğini göstermektedir. Yaz aylarında yükselen COD seviyeleri, su kaynaklarının kirlenme riskine daha açık hale geldiğini ve ekosistem sağlığının korunabilmesi için su arıtma ve atık yönetimi süreçlerinin optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir.

4. SONUÇ

Bu çalışma, Dicle Nehri'nde belirlenen beş farklı gözlem noktasında 2011-2020 yılları arasında yapılan su kalite analizlerinin uzun vadeli trendlerini inceleyerek, nehrin su kalitesindeki değişimleri ortaya koymayı amaçlamıştır. Elde edilen bulgular, fiziksel, kimyasal ve biyolojik parametrelerde yıllar içerisinde belirgin değişimler olduğunu göstermektedir. Özellikle sıcaklık, elektriksel iletkenlik, çözünmüş oksijen ve besin maddeleri gibi parametrelerde



Şekil 3. Dicle Nehri'nde Kimyasal Oksijen İhtiyacı (COD) Değişimi

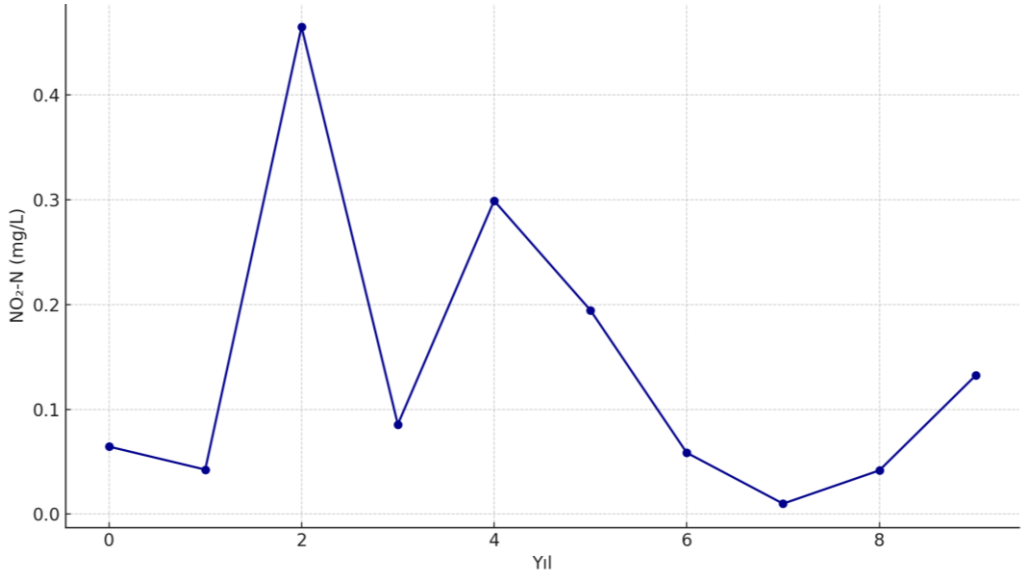
istatistiksel olarak anlamlı trendler gözlemlenmiştir. Bu değişimlerin büyük ölçüde tarımsal faaliyetler, evsel atık deşarjları ve endüstriyel kirlilikten kaynaklandığı düşünülmektedir.

Bu çalışma, Dicle Nehri'nde belirlenen beş farklı gözlem noktasında 2011-2020 yılları arasında yapılan su kalite analizlerinin uzun vadeli trendlerini inceleyerek nehrin su kalitesindeki değişimlerini ortaya koymayı amaçlamıştır.

Elde edilen bulgular, fiziksel, kimyasal ve biyolojik parametrelerde yıllar içerisinde belirgin değişimler olduğunu göstermektedir. Özellikle sıcaklık, elektriksel iletkenlik, çözünmüş oksijen ve besin maddeleri gibi parametrelerde istatistiksel olarak anlamlı trendler gözlemlenmiştir.

Mann-Kendall trend analizi sonuçları, bazı parametrelerde istatistiksel olarak anlamlı artış veya azalış eğilimleri olduğunu ortaya koymuştur. Sen'in Eğim Tahmincisi ile yapılan hesaplamalar ise bu eğilimlerin yönünü ve büyüklüğünü ortaya koyarak, bazı parametrelerde belirgin değişimleri desteklemiştir.

Şen (2012) trend analizi yöntemi ile yapılan değerlendirmeler sonucunda, bazı parametrelerin belirli aylarda daha değişken bir seyir izlediği tespit edilmiştir.



Şekil 4. 2011–2020 yılları arasında Dicle Nehri'nde ölçülen NO_2-N seviyelerinin yıllık ortalama değişimi.

Elde edilen sonuçlar, Dicle Nehri'nin belirli bölgelerinde su kalitesinin zamanla bozulduğunu ve bu durumun büyük ölçüde insan faaliyetlerinden kaynaklandığını göstermektedir. Su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımı ve

korunması açısından su kalitesinin düzenli olarak izlenmesi, kirletici unsurların kontrol altına alınması ve arıtma sistemlerinin etkin bir şekilde işletilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, özellikle evsel ve endüstriyel atıkların doğrudan suya karışmasının önüne geçilmesi, tarımsal faaliyetlerde daha kontrollü gübre ve pestisit kullanımına yönelik düzenlemelerin yapılması büyük önem taşımaktadır.

Çalışmadan elde edilen bulgular, su kaynaklarının korunması ve yönetimi konusunda önemli bilgiler sunmaktadır. Nehir ekosistemlerinin sağlığının korunabilmesi için daha kapsamlı ve uzun vadeli izleme çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmanın sonuçları, gelecekte yapılacak benzer araştırmalara ışık tutarak, su kaynaklarının daha etkin bir şekilde yönetilmesine ve sürdürülebilir su politikalarının oluşturulmasına katkı sağlayacaktır.

Bilgi

Bu çalışma birinci yazarın ikinci yazar danışmanlığında hazırladığı doktora tezinden üretilmiştir.

Kaynaklar

[1] Shiklomanov, I. A. (1993). *World fresh water resources*. In P. H. Gleick (Ed.), *Water in crisis: A guide to the world's fresh water resources* (pp. 13-24). Oxford University Press.
[2] Kundzewicz, Z. W., Mata, L. J., Arnell, N. W., Döll, P., Kabat, P., Jimenez, B., ... & Shiklomanov, I. A. (2007). Freshwater resources and their management. In *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC.
[3] Vörösmarty, C. J., Green, P., Salisbury, J., & Lammers, R. B. (2000). Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *Science*, 289(5477), 284-288. https://doi.org/10.1126/science.289.5477.284
[4] Gleick, P. H. (2014). Water, drought, climate change, and conflict in Syria. *Weather, Climate, and Society*, 6(3), 331–340. https://doi.org/10.1175/WCAS-D-13-00059.1
[5] Falkenmark, M., & Rockström, J. (2006). The new blue and green water paradigm: Breaking new ground for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 132(3), 129-132. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2006)132:3(129)
[6] UN Water. (2021). *Progress on Integrated Water Resources Management: Global indicator 6.5.1 updates and acceleration needs*. United Nations. Retrieved from https://www.unwater.org
[7] UN-Water. The United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change. UNESCO Publishing; 2020.
[8] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press; 2021.
[9] Gleick PH. The World's Water Volume 9: The Biennial Report on Freshwater Resources. Island Press; 2018.
[10] Meybeck, M., Helmer, R., ‘‘The quality of rivers: From pristine stage to global pollution.’’ Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, vol. 75, no. 4, pp. 283-309, 1989.
[11] TürkStat. Türkiye Su ve Atıksu İstatistikleri Raporu. Türkiye İstatistik Kurumu Yayınları; 2021.
[12] Korkmaz N, Avcı M., ‘‘Türkiye’de nehir su kalitesinin değerlendirilmesi ve koruma stratejileri.’’ Çevre Bilimleri Dergisi, vol. 4, no. 2, pp. 85-97, 2012.
[13] Metcalf & Eddy. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. 4th ed. McGraw-Hill Science/Engineering/Math; 2003.
[14] Bartram J, Balance R. Water Quality Monitoring- A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programmes. WHO & UNEP; 1996.
[15] Kendall MG. Rank Correlation Methods. Charles Griffin & Company Ltd; 1975.
[16] Mann. HB., ‘‘Nonparametric tests against trend.’’, Econometrica, vol. 13, no. 3, pp. 245-259, 1945.
[17] Sen, PK., ‘‘Estimates of the regression coefficient based on Kendall’s Tau’’, J Am Stat Assoc, vol. 63, pp. 324, pp. 1379-1389, 1968.
[18] Şen, Z., ‘‘Innovative trend analysis methodology.’’, J Hydrol Eng, vol. 17, no. 9, pp. 1042-1046, 2012.
[19] Helsel DR, Hirsch RM. Statistical Methods in Water Resources. U.S. Geological Survey; 2002.
[20] UNESCO. Water Quality in the 21st Century: Key Challenges and Opportunities. UNESCO Publishing; 2019.

Dicle University
Journal of Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/dumf
duje.dicle.edu.tr

Araştırma Makalesi / Research Article

Farklı Deprem İvmeleri Altında Betonarme Yapıların Zemin Yapı Etkileşimi ile Nümerik Analizi

Numerical Analysis of Reinforced Concrete Structures with Soil-Structure Interaction under Different Earthquake Accelerations

Serhat Yıldız[1*], Mesut GÖR[2]

[1] Fırat Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, seryiltek@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8520-1850

[2] Fırat Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, mgor@firat.edu.tr
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5463-9278

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 21 Nisan 2025
Revizyon 29 Nisan 2025
Kabul 26 Mayıs 2025
Online 30 Haziran 2025

Anahtar Kelimeler:

Zemin, Zemin-Yapı Etkileşimi, PLAXIS, SAP2000, Deprem

ÖZ

Türkiye, aktif fay hatlarının yoğun olduğu bir ülke olması sebebi ile özellikle bazı bölgelerinde yıkıcı etkilere sahip depremler meydana gelebilmektedir. Bu yıkıcı etkiyi azaltmak ise inşaat mühendisliğinin temel amaçlarından biridir. Yapı tasarımı yapılırken, yapının detayları kadar zeminlerin de özellikleri ve davranışları göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu çalışmada, farklı bodrum kat sayısına sahip 7 katlı betonarme yapıların, deprem etkisi altında analizleri yapılarak, bodrum kat sayısının zemin-yapı etkileşimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Oluşturulan modeller ve analizler için SAP2000 ve PLAXIS 2D programları kullanılmıştır. 7 kata sahip yapının, bodrum sayısı 1, 2 ve 3 olacak şekilde değiştirilerek 3 farklı model oluşturulmuştur. Oluşturulan modellerin 4 farklı deprem etkisi altındaki analizleri yapılıp yapıların yatay ve düşey deplasmanları bulunmuştur. 2 farklı program 3 farklı model ve 4 farklı deprem ivme kaydı kullanılarak toplam 24 analiz yapılmıştır. Analizler sonucunda bodrum sayısındaki artışın yatay ve düşey deplasmanlar üzerindeki etkisi görülmüş, iki programın sonuçları değerlendirilmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 21 April 2025
Received in revised form 29 April 2025
Accepted 26 May 2025
Available online 30 June 2025

Keywords:

Soil, Soil-Structure Interaction, PLAXIS, SAP2000, Earthquake

ABSTRACT

Turkey, being a country with a high density of active fault lines, is prone to earthquakes with destructive effects, particularly in certain regions. Reducing these destructive effects is one of the main objectives of civil engineering. When designing structures, it is essential to consider not only the details of the structure but also the properties and behaviors of the soil. In this study, the effects of the number of basement floors on the soil-structure interaction of a seven-story reinforced concrete building under earthquake loading are investigated. The models and analyses were created using the SAP2000 and PLAXIS 2D software. Three different models of the seven-story building were generated, with the number of basement floors set to 1, 2, and 3, respectively. The models were analyzed under four different earthquake records, and the horizontal and vertical displacements of the structures were determined. A total of 24 analyses were conducted, considering two different software, three different models, and four different earthquake ground motion records. The results showed the impact of the increase in the number of basement floors on the horizontal and vertical displacements, and the results from the two software were evaluated.

DOI: 10.24012/dumf.1680953

* Sorumlu Yazar

Giriş

Günümüzde yaşam alanlarının daralması ve nüfusun hızlı bir şekilde artmasına paralel olarak çok katlı yapıların önemi ve sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Ancak, bu hızlı gelişim ile birlikte çeşitli mühendislik problemleri de ortaya çıkmaktadır. Bu sorunların başında, çok katlı yapıların deprem etkisi altındaki davranışı gelmektedir. Güncel uygulamalarda, yapıların deprem analizleri için oluşturulan sonlu eleman modellerinde, zemin rijit veya neredeyse rijit bir davranış sergilediği varsayılmaktadır [1]. Zemin davranışının rijit ya da rijite yakın olarak değerlendirilmesi, zemin-yapı etkileşiminin ihmal edildiği anlamına gelir [2]. Bu tür bir kabul, zemin etkilerinin yapıların yatay ve düşey deplasmanları üzerindeki etkisini göz ardı eden sonlu eleman modellerini ortaya çıkarmaktadır [3]. Zemin koşulları, yapıların performansı üzerinde etkisi önemli derecede fazladır [4]. Zemin ile yapının etkileşimi göz önünde bulundurularak geliştirilen sonlu eleman modellerinin analizi, daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesine olanak tanır [5]. Farklı bodrum kat sayıları gibi parametrelerin değiştirilmesiyle oluşturulan sonlu eleman modellerinde, yatay ve düşey deplasman değerlerinin değişen bodrum kat sayılarına göre farklılıklar gösterdiği görülmektedir [6]. Sonlu eleman modellerinin çok katlı yapılar üzerindeki yüklemeleri (rüzgâr, kar, deprem vb.) zemin-yapı etkileşimi üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Bu etkileşimi etkileyen yüklemeler arasında ise deprem kaynaklı yükler ön plana çıkmaktadır. Depremler sırasında, yatay ve düşey deplasmanlardaki değişim oranları artış göstermektedir. Bu nedenle, deprem etkileriyle oluşan sismik yüklemelerin çok katlı yapılar üzerindeki etkisi, zemin-yapı etkileşiminin önemini artırmaktadır [6]. Deprem etkisi altındaki çok katlı yapıların zemin-yapı etkileşiminin incelenmesi için farklı sonlu eleman modelleri oluşturulması gerekmektedir [7].

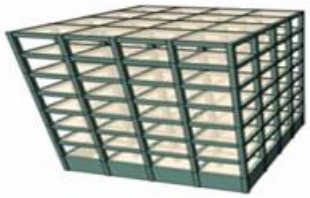
Zemin-yapı etkileşimini incelemek amacıyla farklı modeller geliştirilmektedir. Çok katlı yapılar, doğrudan yöntemle tek bir sistem olarak ele alınıp sonlu eleman modelleri oluşturulmaktadır. Bunun yanı sıra, alt sistem yaklaşımında, üst yapı ve alt yapı için ayrı sonlu eleman modelleri hazırlanmaktadır [8]. Bu tür modellerin oluşturulmasının başlıca nedeni zemin etkileşimi incelendiğinde gerçeğe yakın sonuçlar elde etme gereksinimidir. Çok katlı yapıların farklı bodrum sayılarıyla oluşturulan sonlu eleman modellerinin deprem etkisi altındaki zemin-yapı etkileşimini ele aldığımızda, bodrum kat sayısının artmasının, çok katlı yapının depreme karşı performansını artırdığı görülmektedir. Özellikle, çok katlı yapılarda bodrum kat sayıları azaldıkça yatay ve düşey deplasmanlarda azalmaların meydana geldiği görülmektedir [8].

Bu çalışmada, 1, 2, 3 bodrum kat adedine sahip 7 katlı betonarme yapı modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller üzerinde analizler yapılarak zemin-yapı etkileşimi incelenmiştir. PLAXIS 2D ve SAP2000 programları kullanılarak, her model için analiz yapılmıştır. PLAXIS 2D ve SAP2000 programları için toplam 24 farklı analiz yapılmıştır. Analizler neticesinde ortaya çıkan yatay ve düşey deplasman değerlerinde, bodrum ve normal kat sayısına göre değerlendirmeler yapılmıştır.

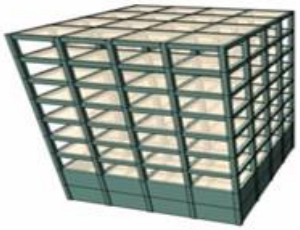
2. Gereç ve Yöntem

2.1. Genel Bilgiler

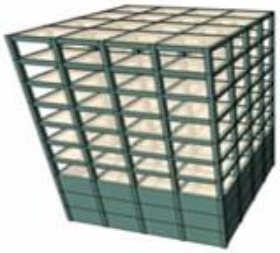
Betonarme yapılar, farklı bodrum kat sayıları (1, 2, 3) ve normal kat sayısı da 7 olacak şekilde modellenmiştir. Oluşturulan yapı modellerinin her katının alanı 400 m^2dir. Tasarımlarda, her modelin bodrum kat yükseklikleri ve normal kat yükseklikleri 3.0 m olacak şekilde kullanılmıştır. Betonarme yapılar çerçeve sistem olacak şekilde modellenmiştir (Şekil 1).



a) 1 bodrum katlı



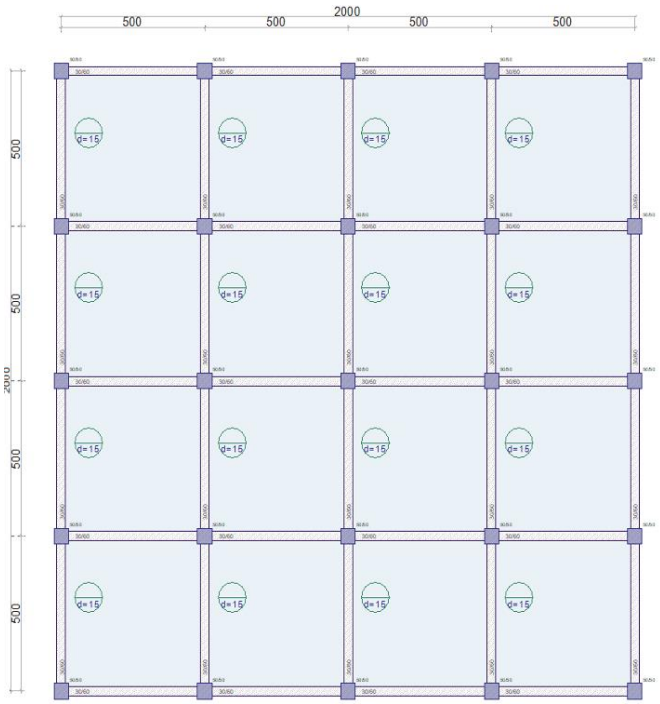
b) 2 bodrum katlı



c) 3 bodrum katlı

Şekil 1. 7 katlı betonarme binaların 3 boyutlu modelleri

Betonarme yapı modellerinde, döşeme kalınlığı 15 cm, kolon boyutları 50x50 cm, kiriş boyutları 30x60 cm, radye temel kalınlığı 100 cm ve bodrum perde kalınlıkları ise 30 cm olarak tasarlanmıştır. Betonarme yapılar planda x ve y yönü için 20.0 m uzunluğa sahiptir. Kolonlar arası mesafe ise 4.0 metredir (Şekil 2). Betonarme yapılarda kullanılan elemanların malzeme özellikleri ve kesitleri Tablo 1'de verilmiştir.



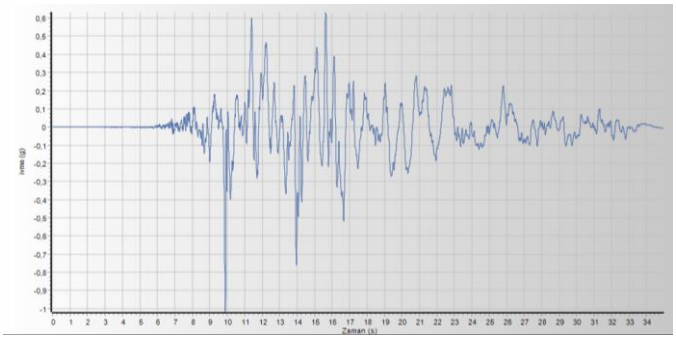
Şekil 2. 7 katlı betonarme yapıların kat planı

Tablo 1. Betonarme yapılarda kullanılan elemanların malzeme özellikleri ve kesitleri

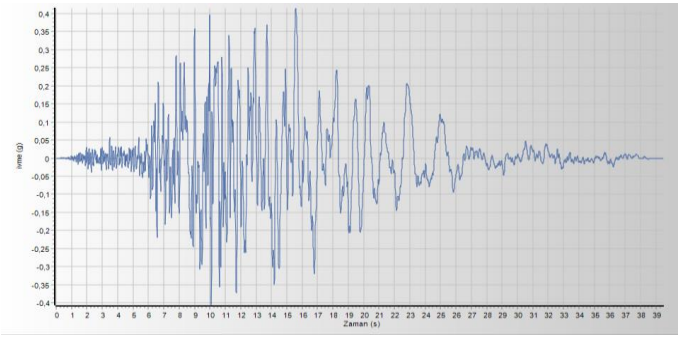
Parametreler	Değerler
Kat Yüksekliği (cm)	300
Bodrum Kat Yüksekliği (cm)	300
Kolon Boyutları (cm)	50x50
Kiriş Boyutları (cm)	30x60
Döşeme Kalınlığı (cm)	15
Perde Kalınlığı (cm)	30
Radye Temel Kalınlığı (cm)	100
Beton Birim Hacim Ağırlığı (kN/m^3)	25
Beton Elastisite Modülü (kN/m^2)	32000000
Betonun Poisson Oranı	0.20

2.1.2. Model Analizlerinde Kullanılan Deprem Kayıtları

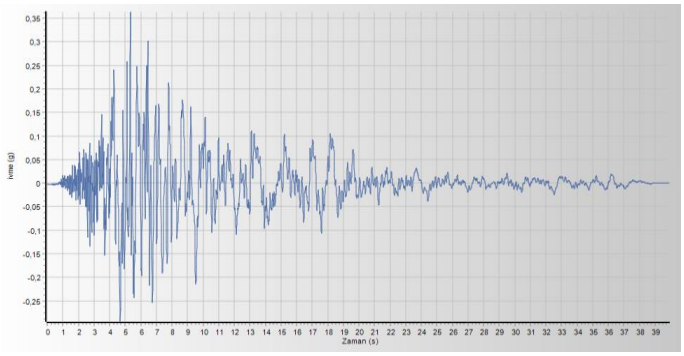
Modeli oluşturulan yapıların, zemin-yapı etkileşiminin deprem yüklemesi altındaki davranışını görmek için farklı depremlere ait 4 ivme kaydı kullanılmıştır (Şekil 3-6). Deprem yüklemesi için deprem kaydı seçilirken büyüklük olarak farklı depremler seçilmiştir. Farklı büyüklükteki depremlere ait deprem ivme kayıtlarının seçilmesinin nedeni, farklı bodrum kat sayılarına sahip yapıların farklı büyüklükteki deprem etkileri altında nasıl davranış sergilediği ve zemin-yapı etkileşimi araştırmaktır. DD-1 için Kocaeli (1999) deprem kaydı, DD-2 için Imperial Valley (1999) deprem kaydı, DD-3 için Loma Prieta (1989) deprem kaydı, DD-4 için Hollister (1974) deprem kaydı seçilmiştir. Deprem kayıtları, SeismoMatch programı kullanılarak tasarım ivme spektrumları ile uyumlu hale getirilmiştir [9].



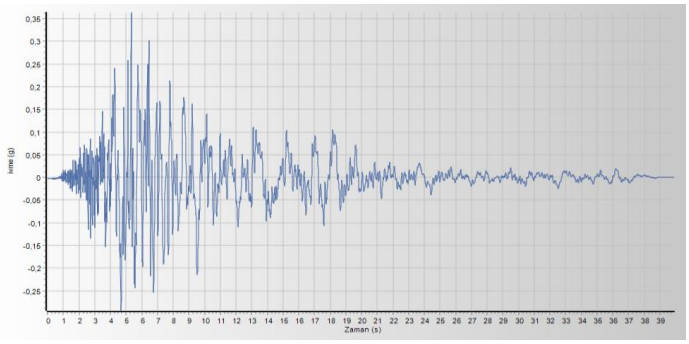
Şekil 3. Kocaeli (1999) depremi ivme-zaman grafiği



Şekil 4. Imperial Valley (1999) depremi ivme-zaman grafiği



Şekil 5. Loma Prieta (1989) depremi ivme-zaman grafiği



Şekil 6. Hollister (1974) depremi ivme-zaman grafiği

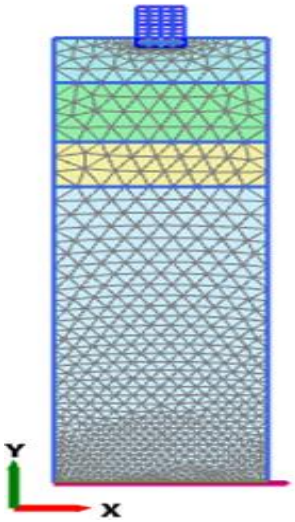
2.2. Sonlu Elemanlar Programları ile Yapılan Modellemeler

2.2.1. SAP2000 Programı ile Modellemeler

Modeller, SAP2000 programında oluşturularak farklı deprem ivme kayıtları altında analiz edilerek değerlendirilmiştir. Tablo 3'te ki Kil-1 malzemesine ait parametreler zemin modelin olarak programa atanmıştır. Zeminin dış kısımlarına sınırlayıcılar eklenerek, zemine ait sınır şartları sağlanmıştır.

2.2.2. PLAXIS 2D Programı ile Modellemeler

Program olarak PLAXIS 2D kullanılarak modellenen zemin-yapı modeline ait sistem, sonlu elemanlara ayrılmıştır. Sonlu elemanlara ayırma işlemi yapılırken, sıklık derecesi olarak en yüksek sıklık tercih edilmiştir. Şekil 7'de oluşturulan sonlu elemanlar ağı gösterilmiştir.



Şekil 7. PLAXIS 2D programı ile oluşturulan zemin-yapı modelinin sonlu elamanlara bölünmüş hali

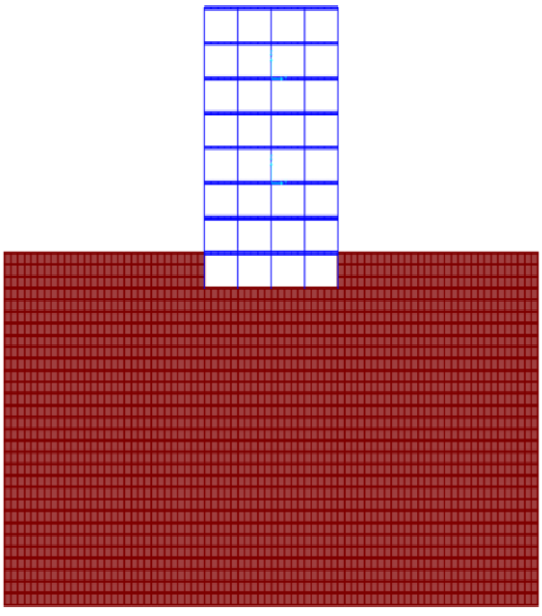
PLAXIS 2D programı için zemin modelinin, yapıya uygun olacak şekilde sınır koşulları belirlenmiştir. Bu sınır koşulları, 80.0 m x 300.0 m olarak belirlenmiştir [10]. 0.0-30.0 m derinliğe kadar Kil-1, 30.0-70.0 m derinliğe kadar Kum, 70.0-100.0 m derinliğe kadar Kil-2, 100.0-300.0 m derinliğe kadar Kil-3 zeminine ait değerler PLAXIS 2D programına aktarılmıştır. Sistemdeki taşıyıcı elemanlara ait değerler ise Tablo 2'de verilmiştir. PLAXIS 2D programında zeminlere ait seçilebilecek farklı matematiksel modeller bulunmaktadır. Bu modeller sayesinde, farklı şartlar ve ortamlarda bulunan zeminlere ait gerilme, şekil değiştirme davranışları tanımlanabilmektedir. Bu 4 farklı model, Mohr-Coulomb Zemin Modeli, Doğrusal Elastik Zemin Modeli, Pekleşen Zemin Modeli ve Yumuşak Zemin Modelidir. Analiz yapılırken tercih edilen zemin modeli, Pekleşen Zemin Modelidir. Zemin-yapı etkileşimi için belirlenen ortam sınır şartları, PLAXIS 2D programı yardımıyla kolaylıkla yapılabilmektedir. Her doğrultuda bulunan sınırlara ait bir sınır koşulu bulunmalıdır. Bir probleme ait sınır koşulları tanımlanmazsa eğer, probleme ait deplasman durumları belirsiz hale gelmektedir [10]. PLAXIS 2D için mevcutta bulunan standart sınır koşulları tercih edilmiştir. Standart sınır koşulları, zemin modelinin en altında z düşey ve y yatay deplasmanların oluşmasını engellemekte (uy=0, uz=0), zemin modelinin kenarlarında ise, sadece düşey harekete izin verilmektedir (ux=0, uy=serbest). Tercih edilen bu sınır koşulları zemin modellerine ait problemlerin birçoğunda geçerli olmaktadır [8].

Tablo 2. Taşıyıcı elemanları boyutları ve malzeme özellikleri

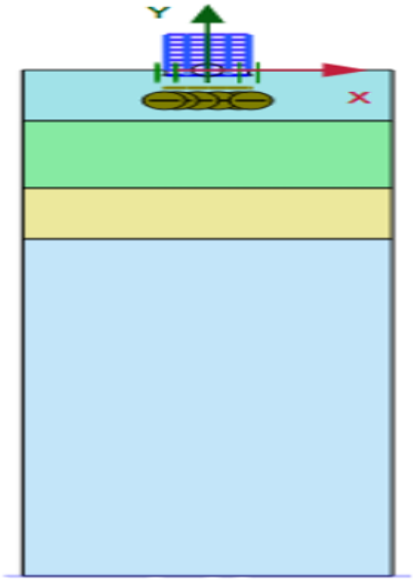
Parametre	Kolon	Bodrum Perdesi	Radye Temel	Döşeme
Kalınlık (cm)	50	30	100	15
EA_1 (kN/m)	$16E^6$	$9.6E^6$	$32E^6$	$4.8E^6$
EI ($kN/m^2/m$)	333400	72000	2667000	9000
Poisson Oranı	0.20	0.20	0.20	0.20

2.2.3. Model Zemin Özellikleri

Zemin modeli tasarlanırken, PLAXIS 2D ve SAP2000 programları için farklı modellenmiştir. Modellemeden sonra analizler için sonlu elemanlara ayırma yöntemi kullanılmıştır [11]. SAP2000 programı kullanım amacı olarak direkt zemine yönelik bir program olmadığı için sonlu elemanlara ayırmada, zemin boyutunun büyüklüğü işlem süresini çok etkilemektedir. İşlem süresinin ideal olması için SAP2000 programında zemin modeli x yönünde 80.0 m, y yönünde 80.0 m ve z yönünde 30.0 m olarak tasarlanmıştır (Şekil 8.a). PLAXIS programında, 2 boyutlu model oluşturulduğundan, yatayda 80.0 m genişliğe sahip düşey de ise 300.0 m derinliğe sahip zemin modellenmiştir (Şekil 8.b). Oluşturulan zemin modellerinde kullanılan zemin parametreleri Tablo 3'te verilmiştir [8].



(a)



(b)

Şekil 8. SAP2000 ve PLAXIS programlarında oluşturulan zemin modelleri

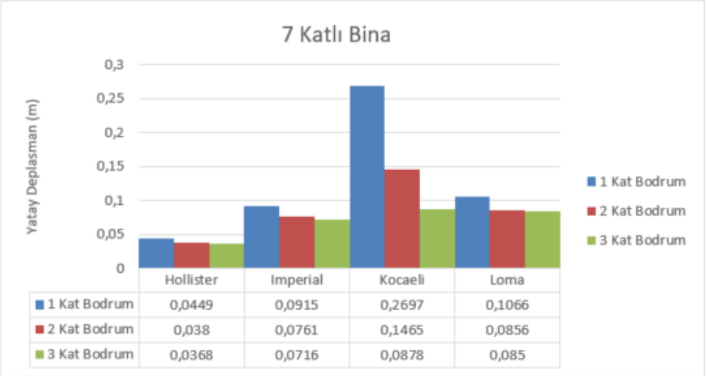
Tablo 3. PLAXIS programında kullanılan zemin parametreleri

Parametre	Kil-1	Kum	Kil-2	Kil-3
Derinlik (m)	0-30.0	30.0-70.0	70.0-100.0	100.0-300.0
Malzeme Modeli	Pekleşen Zemin	Pekleşen Zemin	Pekleşen Zemin	Pekleşen Zemin
Doygun B.H.A. (kN/m^3)	18.0	19.0	20.0	20.0
Doğal B.H.A. (kN/m^3)	17.0	18.0	19.0	19.0
Poisson Oranı	0.20	0.20	0.20	0.20
Elastisite Modülü (kN/m^2)	10000	20000	70000	80000
Kohezyon (kN/m^2)	7.0	2.0	12.0	15.0
İçsel Sürtünme Açısı (°)	27.0	33.0	30.0	30.0
K_0 Katsayısı	0.5460	0.4554	0.5000	0.5000

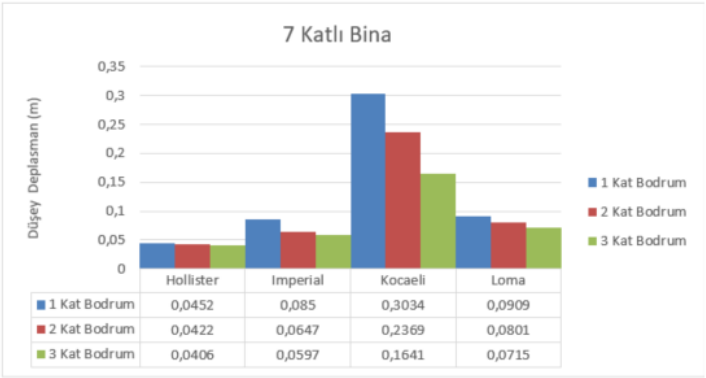
3. Bulgular ve tartışma

3.1. SAP2000 ile Elde Edilen Analiz Sonuçları

Analizlerin neticesinde bulunan deplasman değerleri Şekil 9 ve Şekil 10'da gösterilmiştir. Değerler incelendiğinde, bodrum kat sayısındaki değişime bağlı olarak yatay ve düşey deplasman değerlerinin değiştiği sonucu ortaya çıkmıştır. Yatayda meydana gelen en büyük deplasman, Kocaeli depremi yüklemesinde ve 7 katlı (1 bodrum katlı) yapıda 0.2697 m olarak hesaplanmıştır. Meydana gelen en düşük yatay deplasman ise Hollister depremi yüklemesinde ve 7 katlı (3 bodrum katlı) yapıda 0.0368 m olarak hesaplanmıştır.



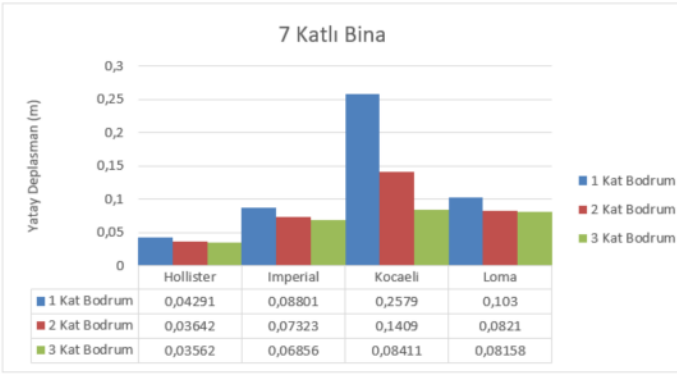
Şekil 9. 7 katlı betonarme yapının yatay deplasman değerleri



Şekil 10. 7 katlı betonarme yapının düşey deplasman değerleri

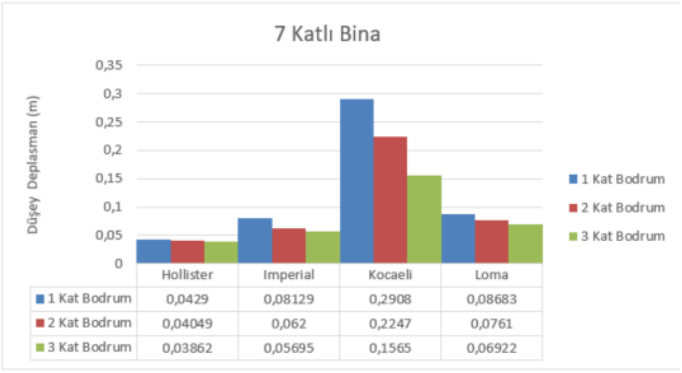
3.2. PLAXIS 2D ile Elde Edilen Analiz Sonuçları

Analizlerin neticesinde bulunan deplasman değerleri Şekil 11 ve Şekil 12'de gösterilmiştir. Değerler incelendiğinde, bodrum kat sayısındaki değişime bağlı olarak yatay ve düşey deplasman değerlerinin değiştiği sonucu ortaya çıkmıştır. Yatayda meydana gelen en büyük deplasman, Kocaeli depremi yüklemesinde ve 7 katlı (1 bodrum katlı) yapıda 0.2579 m olarak hesaplanmıştır. Meydana gelen en düşük yatay deplasman ise Hollister depremi yüklemesinde ve 7 katlı (3 bodrum katlı) yapıda 0.03562 m olarak bulunmuştur.



	Hollister	Imperial	Kocaeli	Loma
1 Kat Bodrum	0,04291	0,08801	0,2579	0,103
2 Kat Bodrum	0,03642	0,07323	0,1409	0,0821
3 Kat Bodrum	0,03562	0,06856	0,08411	0,08158

Şekil 11. 7 katlı betonarme yapının yatay deplasman değerleri



	Hollister	Imperial	Kocaeli	Loma
1 Kat Bodrum	0,0429	0,08129	0,2908	0,08683
2 Kat Bodrum	0,04049	0,062	0,2247	0,0761
3 Kat Bodrum	0,03862	0,05695	0,1565	0,06922

Şekil 12. 7 katlı betonarme yapının düşey deplasman değerleri

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, 7 katlı betonarme binalar için, zemin-yapı etkileşimi, büyüklük olarak farklı depremler ve bodrum kat sayısındaki değişime göre incelenmiştir. Bu amaçla, farklı bodrum kat sayısına (1, 2, 3) ve 7 normal kat sayısına sahip sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Bu modellerin SAP2000 ve PLAXIS 2D sonlu elemanlar programları kullanılarak, 4 farklı deprem ivme kaydı altında dinamik analizleri yapılmıştır. Dinamik analizlerin neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

-SAP2000 programı için düşeyde oluşan en büyük deplasman değeri, Kocaeli depremi yüklemesinde ve 7 katlı (1 bodrum katlı) yapıda 0.3034 m olarak hesaplanmıştır. En küçük düşey deplasman değeri ise Hollister depremi altında ve 7 katlı (3 bodrum katlı) yapıda 0.0406 m olarak hesaplanmıştır.

-PLAXIS 2D programı için düşeyde oluşan deplasman değeri en fazla, Kocaeli depremi yüklemesinde ve 7 katlı (1 bodrum katlı) yapıda 0.2908 m olarak hesaplanmıştır. En az düşey deplasman değeri ise Hollister depremi altında ve 7 katlı (3 bodrum katlı) yapıda 0.03862 m olarak bulunmuştur.

-Deplasman değerlerindeki azalma, bodrum kat sayısındaki artışa bağlı olduğu tespit edilmiştir. Farklı bodrum kat sayıları, en çok Kocaeli depremindeki deplasman değerlerini değiştirmiştir.

-SAP2000 programı kullanılarak yapılan analizler neticesinde bulunan, yatay ve düşey deplasman değerlerinin, PLAXIS 2D programı kullanılarak yapılan analizler neticesinde bulunan deplasman değerlerine göre %5-10 daha büyük olduğu sonucuna varılmıştır. Bu deplasman değerleri farklılıklarının, SAP2000 sonlu elemanlar programının üst yapıyı ve deprem etkilerini, PLAXIS 2D programına göre daha detaylı bir şekilde modelleyebilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, PLAXIS 2D sonlu elemanlar programının ise SAP2000 programına göre zemin modeli ve zemin sınır şartlarını daha detaylı modellemesi de oluşan deplasman değerlerinin farklılığının nedenleri arasında olabilir. İki programda yapılan analizlerden elde edilen sonuçların arasındaki farklılıkların oluşmasındaki etkenlerin daha iyi anlaşılması için çok daha detaylı çalışmaların yapılması önerilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, "Çok katlı yapıların farklı deprem etkileri altında zemin-yapı etkileşiminin nümerik analizi" tezi kapsamında hazırlanmıştır. Yazarlar, tez savunma jürisine kıymetli katkılarından dolayı teşekkür eder.

Yazar katkısı

Mesut GÖR, çalışmayı planlamış, tasarlamış ve kontrol etmiştir. Serhat YILDIZ ise çalışma hakkında verileri toplamış ve gerekli analizleri yaparak makaleyi yazmıştır.

Kaynakça

[1] E. Aydın, B. Öztürk, A. Bogdanovic, E. N. Farsangi, "Influence Of Soil-Structure İnteraction (SSI) On Optimal Design Of Passive Damping Devices," Structures, Volume 28, Pages 847-862, ISSN 2352-0124, 2020.

[2] V. Anand, S. R. S. Kumar, "Seismic Soil-structure Interaction: A State-of-the-Art Review," Structures, Volume 16, Pages 317-326, ISSN 2352-0124, 2018.

[3] Y. Yönet, "Yapı-Zemin Etkileşiminin Binaların Deprem Davranışına Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, 2022.

[4] W. Al Agha, W. A. Almorad, N. Umamaheswari, A. Alhelwani, "Study The Seismic Response Of Reinforced Concrete High-Rise Building With Dual Framed-Shear Wall System Considering The Effect Of Soil Structure İnteraction," Materials Today: Proceedings, Volume 43, Part 2, 2021, Pages 2182-2188, ISSN 2214-7853, 2021.

[5] M. Alitalesh, H. Shahnazari, M. H. Baziar, "Parametric Study On Seismic Topography-Soil-Structure Interaction; Topopgraphic Effect," Geotech Geol Eng., doi10.1007/s10706-018-0489-8, 2018.

[6] W. S. Hall, G. Oliveto, "Boundary Element Methods for Soil-Structure Interaction," Kluwer Academic Publishers, New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow, 2004.

[7] G. A. L. Jimenez, D. Dias, "Dynamic Soil-Structure Interaction Effects In Buildings Founded On Vertical Reinforcement Elements," CivilEng, 3, 573–593, 2022.

[8] Z. K. Erginsoy, "Sığ Temelli Binalarda Bodrum Kat Adedinin Deprem-Zemin-Yapı Etkileşimi Bakımından İncelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, 2019.

[9] S. Yıldız, "Çok Katlı Yapıların Farklı Deprem Etkileri Altında Zemin-Yapı Etkileşiminin Nümerik Analizi," Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, 2023.

[10] T. Liang, B. H. Maula, L. Xianzhang, S. Lei, S. "Numerical Simulations Of Shake-Table Experiment For Dynamic Soil-Pile-Structure İnteraction İn Liquefiable Soils," Earthq Eng & Eng Vib, 13: 171-180, 2014.

[11] M. Gör, "Kazıklı Temellerin Statik Düşey Yükler Etkisi Altında Modellenmesi," Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, 2019.