



Dicle Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

mühendislikdergisi
journal of engineering

Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
mühendislikdergisi
Cilt: 15, Sayı: 1, Mart 2024 ISSN: 1309-8640

Dicle Üniversitesi Adına yayın Sahibi / Privilege Owner

Mehmet Sıraç ÖZERDEM

Baş Editör / Editor-in-Chief

Mehmet Sıraç ÖZERDEM

Alan Editörleri / Field Editors

İdris BEDİRHANOĞLU
Abdurrahman SAYDUT
Ömer TÜRK
Bilal GÜMÜŞ
Mehmet Sıraç ÖZERDEM
Atilla Gencer DEVECİOĞLU
Fevzi ÖNEN
Hasan POLAT
Cafer BUDAK
Mesut HÜSEYİNOĞLU
Fatma Deniz ÖZTÜRK
Mehmet Salih KESKİN
Erhan ÇETİN
Muhammet Ali ARSERİM

Tasarım-Dizgi / Designing-Editing

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.

Filiz Pirođlu (ITU)
Yıldırım Serhat Erdoğan (YTU)
Şahin Güneş (University of Birmingham)
Ebru Başpınar Tuncay (Süleyman Demirel Üniversitesi)
Alaaddin Vural (Ankara Üniversitesi)
Cengiz Çoşkun (Mardin Artuklu Üniversitesi)
Erdoğan Aldemir (Batman Üniversitesi)
Halit Irmak (Mardin Artuklu Üniversitesi)
Sabir Rüstemli (Bitlis Eren Üniversitesi)
Murat Köseođlu (İnönü Üniversitesi)
Kıvanç Taşkın (Eskişehir Teknik Üniversitesi)
Cüneyt Vatansever (ITU)
Oğuz Cem Çelik (ITU)
Hamit Adin (Batman Üniversitesi)
Cenk Yanen (Fırat Üniversitesi)
Abuzer Çalışkan (Fırat Üniversitesi)
Ayşe Bilhan (Nevşehir Üniversitesi)
Gülüzar Çit (Sakarya Üniversitesi)
Rıdvan Yayla (Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi)
Emre Çomak (Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi)
Zehra Kadirođlu (Fırat Üniversitesi)
Gülây Onuşluel Gül (Dokuz Eylül Üniversitesi)
Ebru Eriş (Ege Üniversitesi)
Hüseyin Hışıl (University of Wollongong)
Taha Etem (Çankırı Karatekin Üniversitesi)
Murat Ak (Akdeniz Üniversitesi)
Osman Hulusi Ören (Şırnak Üniversitesi)
Ömer Faruk Dursun (İnönü Üniversitesi)
Ramazan Özgür Dođan (Gümüşhane Üniversitesi)
Bülent Gürsel Emiroğlu (Kırıkkale Üniversitesi)
Ömer Cihan (Sakarya Üniversitesi)
Yunus Onur Yıldız (Sinop Üniversitesi)

Ferdi Dođan (Adıyaman Üniversitesi)
Ali Arı (İnönü Üniversitesi)
Kenan Donuk (Şırnak Üniversitesi)
Esra Kavalcı Yılmaz (Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi)
Çağrı Kaymak (Fırat Üniversitesi)
Can Çivi (Manisa Celal Bayar Üniversitesi)
Mücahit Sütçü (Manisa Celal Bayar Üniversitesi)
Gülay Çiçek (Beykent Üniversitesi)
Kübra Uyar (Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi)
Abidin Çalışkan (Batman Üniversitesi)
Emrullah Acar (Batman Üniversitesi)
Esra Dinçer (Gedik Üniversitesi)
Esra Kavalcı Yılmaz (Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi)
Yasin Varol (Fırat Üniversitesi)
Dođan Engin Alnak (Sivas Cumhuriyet Üniversitesi)
Murat Kocagül (Yozgat Bozok Üniversitesi)
Hasan Özkaynak (Beykent Üniversitesi)
Okay Altun (Hacettepe Üniversitesi)
Murat Erdemođlu (İnönü Üniversitesi)
Hanifi Çanakçı (Hasan Kalyoncu Üniversitesi)
Fatih Çelik (Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi)
Mahmut Yavuz (Eskişehir Osmangazi Üniversitesi)
İbrahim Uđur (Süleyman Demirel Üniversitesi)
Nazmi Şengün (Süleyman Demirel Üniversitesi)
Mahmut Bingöl (Yalova Üniversitesi)
Raif Sakin (Balıkesir Üniversitesi)
Ayla Tekin (Manisa Celal Bayar Üniversitesi)
Emre Erkan (Batman Üniversitesi)
Tamer Bağatur (DU)
Halil Görgün (DU)
Emrah Aslan (DU)

İçindekiler / *Table of Contents*

Elektrik Elektronik Mühendisliği / Electrical and Electronics Engineering

- Sinema verilerinin Neo4j çizge veritabanı ile modellenmesi ve analizi (Araştırma Makalesi)
Modeling and analysis of cinema data using Neo4j graph database (Research Article)
Gizem Tangalay Dalgın, Resul Daş **1**
- Experimental Investigation of High-Frequency Effect on Ignition and Damping of Corona Discharges (Research Article)
İlker Arı, Fevzi Hansu **15**
- PEM yakıt pillerinde PSO tabanlı PI ve FOPI kontrollü DC/DC dönüştürücülerine ilişkin performansların karşılaştırılması (Araştırma Makalesi)
Comparison of performances of PSO-based PI and FOPI controlled DC/DC converters in PEM fuel cells (Research Article)
Büşra Nur Uçmaz, Yurdagül Benteşen Yakut **23**
- A Multi-Metric Model for analyzing and comparing extractive text summarization approaches and algorithms on scientific papers (Research Article)
Mehmet Ali Dursun, Soydan Serttaş **31**
- Gender, age, and ethnicity estimation by image processing (Research Article)
Mesut Uysal, Mehmet Fatih Demiral **49**
- Kriptografide Rasgelelik Kavramı ve Gerçek Rasgele Sayı Üreteçlerinin Test Metodolojisi (Araştırma Makalesi)
Concept of Randomness in Cryptography and Testing Methodology of True Random Number Generators (Research Article)
Ali Murat Garipcan, Ebubekir Erdem **61**
- Çoklu bulut teknolojisi yönetimi için web tabanlı bir araç tasarımı ve geliştirilmesi (Araştırma Makalesi)
Design and development of a web-based tool for multi-cloud technology management (Research Article)
Hacer Özyurt, Yusuf Can Akier, Özcan Özyurt **77**
- Using GAN Methods for Aerial Images Segmentation (Research Article)
Sara Altun Güven, Buket Toptaş **87**
- The Effect of Latent Space Vector on Generating Animal Faces in Deep Convolutional GAN: An Analysis (Research Article)
İsa Ataş **99**
- Edge Boosted Global Awarred Low-light Image Enhancement Network (Research Article)
Büşra Söylemez, Serdar Çiftçi **107**
- Controlling the Mobile Robot with the Pure Pursuit Algorithm to Tracking the Reference Path Sent from the Android Device (Research Article)
Ahmet Top **119**

Makina Mühendisliği / Mechanical Engineering

Experimental Analysis and Finite Element Modeling of S-Core Sandwich Panel Composites Drop Impact Response (Research Article)

Hasan Murat Öztemiz, Şemsettin Temiz 131

Pt-Al/Grafen-KNT Nanoyapılarının Mekanik Performansı; Bir Moleküler Dinamik Simülasyonu (Research Article)

Mechanical Performance of Pt-Al/Graphene-CNT Nanostructures; A Molecular Dynamics Simulation (Research Article)

Ünal Değirmenci 141

Boriding Effect on the Hardness of AISI 1020, AISI 1060, AISI 4140 Steels and Application of Artificial Neural Network for Prediction of Borided Layer (Research Article)

Mehmet Özer, Fatih Balıkoğlu, Tayfur Kerem Demircioğlu, Yunus Emre Nehri 153

Düşük yük koşulları altında tek silindirli dizel bir motorun yanma ve emisyonlarının tolüen ilavesi ile değişiminin sayısal olarak incelenmesi (Araştırma Makalesi)

Numerical investigation of toluene addition and changes in combustion and emissions of a single cylinder diesel engine under low load conditions (Research Article)

Mutlu Okçu, Müjdat Fırat 161

Kör delik delmenin alüminyum 5754 ile oluşturulan tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımına etkisi (Araştırma Makalesi)

Effect of blind hole drilling on shear strength of single lap adhesive joints with Aluminum 5754 (Research Article)

Ali Işıқтаş 169

Maden Mühendisliği / Mining Engineering

Havuzdere, Geyikdere, İnebeyli ve Tepeköy (Karamürsel, Yalova, Türkiye) Civarındaki Zeolitik Tüflerin Mineralojik ve Petrografik Özellikleri (Araştırma Makalesi)

Mineralogical and Petrographic Characteristic of Zeolitic Tuffs from Havuzdere, Geyikdere, İnebeyli and Tepeköy (Karamürsel, Yalova, Turkey) (Research Article)

Mustafa Albayrak, Asuman Kahya 177

Investigation of the settling behavior of lateritic nickel ores in the CCD process after HPAL (Research Article)

Öykü Keskin, N. Metin Can 191

Bazalt Agregası Üretim Tesisinde Fine-Kinney, HRNS ve John-Ridley İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirme Yöntemlerinin Uygulamalı Karşılaştırılması (Araştırma Makalesi)

Comprehensive Comparison of Fine-Kinney, HRNS and John-Ridley Risk Assessment Methods in an Actual Basalt Aggregate Production Plant (Research Article)

Özgür Akkoyun, Mehmet Yasin Fidan 201

İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering

- Endüstriyel Depo Raf Sistemlerinin Yapısal Güvenliğinin Dinamik Etkiler Altında İncelenmesi (Araştırma Makalesi)
Structural Safety Investigation of Industrial Steel Storage Rack Systems Under Dynamic Effects (Research Article)
Alper Deniz, Ülgen Mert Tuğsal **209**
- Çift tabakalı çelik uzay kafes kubbe sistemlerinin yapısal performansının incelenmesi
İncelenmesi (Araştırma Makalesi)
Evaluation of structural performance of double layer steel space lattice dome systems (Research Article)
Mehmet Ali Bektaş, Mehmet Sedat Hayalioğlu **223**
- Van ilinin kuraklığının SPI ve SPEI yöntemlerine göre değerlendirilmesi
(Araştırma Makalesi)
Assessment of drought in Van province according to SPI and SPEI methods (Research Article)
Mahsum Aydın **237**
- Experimental study on the aeration performance of water jet which is performed by a venturi device (Research Article)
Şermin Koçyiğit, Muhammet Emin Emiroğlu **251**
- Dairesel ön duvar kesitli salınlı su sütunu tipi enerji dönüştürücüde verim artışı
(Araştırma Makalesi)
Efficiency improvement of an oscillating water column with a cylindrical frontwall underlip (Research Article)
Anıl Çelik **261**
- Kahramanmaraş depremi sonrası oluşan gaz beton atıkları ile stabilize edilmiş killi kum zeminin geoteknik özelliklerinin araştırılması (Araştırma Makalesi)
Investigation of geotechnical properties of clayey sand soil stabilized with aerted concrete wastes after the Kahramanmaraş earthquake (Research Article)
Muhammet Çınar **269**

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 kullanılabilirliği 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.



Sinema verilerinin Neo4j çizge veritabanı ile modellenmesi ve analizi

*Modeling and analysis of cinema data using Neo4j graph database*¹Gizem Tangalay Dalgın, ²Resul Daş¹Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü
gizemtangalay@gmail.com ORCID: 0009-0003-0285-5360²Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü
rdas@firat.edu.tr ORCID: 0000-0002-6113-4649

MAKALE BİLGİLERİ

*Makale Geçmişi:*Geliş 18.08.2023
Revizyon 20.11.2023
Kabul 30.11.2023
Online 29.03.2024*Anahtar Kelimeler:**Neo4j, Sinema Verileri, Çizge
Modelleme, Çizge Görselleştirme.*

ÖZ

Günümüzde kurum veya kuruluşlar için veri, önemli bir varlık haline gelmiştir. İnternet ortamındaki hızlı gelişmeler ile sinema verileri de hızla büyümekte ve bu veriler arasındaki ilişki giderek daha karmaşık hale gelmektedir. Çizge veri tabanı mimarisi, elde bulunan verilerin model tasarımında varlıklar arasındaki ilişkiyi vurgulayan, verileri modellemek için etkili bir araçtır. Geleneksel veri tabanlarına göre daha karmaşık verileri depolamakta ve daha hızlı bir şekilde sunmaktadır. Bu çalışmada; sinema verileri ve karmaşıklaşan ilişkiler incelenerek neo4j çizge veri tabanı ile modellenmektedir. Bu sayede veriler arası ilişkiler daha kolay bir şekilde görüntülenmekte, sorgulanabilmekte ve daha kolay bir öğrenme imkanı sunmaktadır. Çalışma ile Neo4j çizge veri tabanı karmaşık ve aralarında birden fazla ilişki bulunan verileri modellemede oldukça başarılı sonuçlar sunduğu görülmüştür. Sinema verilerini depolamak ve yönetmek için Neo4j veri tabanını kullanmak, bir sinema web sitesi için kullanıcının gereksinimlerini ve ilgi alanlarını karşılamasını kolaylaştırdığı görülmektedir. Sinema adı, yılı, yönetmeni, oyuncularını, sinema filminin hasılatı, seyirci sayısı ve sinemanın türü gibi değişkenler dikkate alınarak çizge modellemesi ve analizi yapılarak başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

ARTICLE INFO

*Article history:*Received 18.08.2023
Received in revised 20.11.2023
Accepted 30.11.2023
Available online 29.03.2024*Keywords:**Neo4j, Cinema Data, Graph
Modeling, Graph Visualization**Doi: 10.24012/dumf.1343167*

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

Nowadays, data has become a crucial asset for institutions and organizations. With the rapid developments in the online environment, film data is also rapidly growing, and the relationships among these data are becoming increasingly complex. Graph database architecture is an effective tool for modeling data by emphasizing the relationships between entities. It can store more complex data and present it more quickly compared to traditional databases. In this study, cinema data and the growing complexities in relationships are examined, and they are modeled using the Neo4j graph database. This allows for easier visualization and querying of relationships between data, providing an easier learning opportunity. The study shows that the Neo4j graph database provides successful results in modeling complex data with multiple relationships. Using the Neo4j database to store and manage cinema data facilitates meeting the requirements and interests of users for a cinema website. By considering variables such as the movie's name, year, director, cast, box office revenue, audience size, and genre, successful results were achieved through graph modeling and analysis.

Giriş

İnternetteki gelişmeler, fiziksel cihazlar ve sanal bileşenler sayesinde dünya sınırları ortadan kalkmaktadır. İnsanlar giderek daha fazla bilgiye daha hızlı ve kolay bir şekilde ulaşabilir hale gelmektedir. Bilginin az olduğu, ulaşamadığı bir çağdan aşırı bilgi çağına girilmektedir. Zengin içeriğe sahip bu ortamda pek çok karmaşık ve değişken bilgi ile karşılaşmaktadır ve bu kadar karmaşıklaşan yapı içerisinde faydalı içeriğe hızlı bir şekilde ulaşmamız giderek zorlaşmaktadır. Bu zorlukları hafifletmek veya ortadan kaldırmak için verilerin işlenmesi, sınıflandırılması, ortaya anlamlı verilerin çıkarılması, verilerin görselleştirilmesi oldukça faydalıdır. Veriler arasında kurulacak anlamsal ağ sağlanan bilgileri daha sağlıklı tanımlar ve bilgiyi zenginleştirir.

Veri tabanları verileri kategorize bir şekilde tutarak, kolay bir şekilde ulaşılmasını ve yönetilmesini sağlamaktadır. İlişkisel veri tabanlarının ardından Çizge veri tabanları ortaya çıkmıştır. Son yıllarda, ürün ortamı için Neo4j, Infinite, Graph, DEX, InfoGrid, HyperGraphDB, Trinity vb. gibi bir dizi yüksek performanslı Çizge veri tabanı bulunmaktadır [1]. Bu veri tabanlarının arasında Neo4j; Java temelli, açık kaynak kodlu bir veri tabanı yazılımıdır. Elde bulunan veriler tablolarda değil düğümler ve düğümler arasındaki ilişkilerden oluşan ağ yapısında tutulur. Düğümler varlıkları temsil eder. Şekil 1'de Neo4j platformu örnek çizge model görünümü yer almaktadır. Günümüzde verilerin boyutu giderek artmaktadır ve verilerin arasındaki ilişki giderek karmaşıklaşmaktadır. Genellikle verinin kendisine değil, anlamlandırmak için verilerin arasındaki ilişkiye odaklanmak gerekir ve geleneksel olan veri tabanları bu isteği karşılayamamaktadır. Neo4j çizge veri tabanı bu konuda işimizi kolaylaştırmaktadır. Bir Çizge veri tabanındaki öğeler, olası herhangi bir şekilde birbirine bağlanabilir. İnsanlar günlük hayatında temel ihtiyaçlarının yanı sıra eğlenceye de ihtiyaç duyarlar. Bu eğlencelerden biri de film seyretmektir. Filmler türü ve izleyenlerinin yaşı fark etmeksizin genellikle her insanın dikkatini çekmektedir. Son yıllarda çok fazla sinema filmi ve televizyon dizisi çekilmektedir, ancak bu film ve dizilerin çok azı piyasada başarılı olmaktadır. Bu nedenle, filmlerin ve televizyon dizilerinin başarı faktörlerinin analizi, yapımcılar ve yatırımcılar için çok önemlidir. Büyük verilerin bulunduğu bu çağda, veri kaynakları çok değerlidir ve yapımcılar, yatırımcılar dâhil olmak üzere tüm tarafların dikkatini çekmiştir. Bunu sinema filmleri alanında kullanmak, sinema film endüstrisinin yeniliği ve gelişimi için önemli bir destek sağlayabilir. Manevi kültürün bir yansıması olan sinema filmleri, gelir elde etmek için önemli araçlardan biridir; Ekonomik kazancı arttırabilmek için yapımcı, yatırım planını yaparken yatırım riskini ve yatırımın gelirini tam olarak hesaplayacak ve seyircinin ihtiyaçları ile birlikte potansiyel gelir hesaplanacaktır. Yapımcı, bu büyük verileri analiz ederek, kendi aralarında sıralayarak filmlerin yapım ekibi, sektördeki pazar ortamı gibi etkileyen temel faktörleri detaylı bir şekilde değerlendirebilir, yatırımcılara kapsamlı ve bilimsel veriler sunabilir. Film verileri içeren bir web sitesinde yalnızca film videoları depolanmaz. Yer alan filme ait yönetmenler, yazarlar, oyuncular vb. bilgilerin de depolanması gerekir. Çok sayıda ilişki bulunduğu geleneksel veri tabanları istenilen performansı gösteremez ve bu yer alan tabloların güncellenmesi de zorlaşmaktadır.

Örneğin, iki filmin yönetmenlerinin başka filmlerle ortak olup olmadığı bulunmak istenildiğinde, iki filmin yönetmenlerinin yönetmenliğini üstlendiği diğer filmleri bulmak ve daha sonra bu filmler arasında bir ortaklık olup olmadığını incelenmesi gerekir. Bu nedenle film verilerinin araştırılması, incelenmesi ve işlenmesinde ilişkisel olmayan veri tabanlarını kullanmak daha uygun bir seçimdir. Çizgeler tarih boyunca çözülmemiş birçok problemin çözümü ve analizi için modeller oluşturmuştur. Bu modellerin çok çeşitli tür ve formatları vardır. Çizge görselleştirme problemlerin anlaşılması ve takip edilmesi açısından kolaylık sağladığından büyük önem taşımaktadır. Günümüzde Çizgeler o kadar popüler hale geldi ki bilim dünyasında hemen her alanda Çizgelerle modellenen bir algoritmayla karşılaşmak mümkündür. Bilgisayar bilimi, sosyal bilimler, dil bilimi, mühendislik, matematik, tıp gibi her alanda Çizgelerle karşılaşmaktadır [2]. Neo4j çok büyük sayıda karmaşık, dinamik, yapılandırılması düşük verileri işlemek ve yönetmek için uygun olan bir veri tabanıdır. Veri tabanını oluşturmak, veri tabanında sorgulamalar yapmak, verilerde güncellemeler vb. işlemler yapmak için uygundur. Sosyal ağlar ve bilgilerin görselleştirilmesi vb. alanlarda veri depolama sorunlarını çözmek için oldukça etkili bir yöntemdir.

Bu makale çalışmasında çizge modelleme incelenmiş ve sinema verilerinin Neo4j ile çizge modelleme uygulaması gerçekleştirilmiştir. Birinci bölümde konu ile ilgili açıklamalar yapılmış ve izlenecek yollar anlatılmıştır. İkinci bölümde çizge veri tabanları ile ilgili bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde Neo4j veri tabanı tanıtılmıştır. Dördüncü bölümde asıl çalışmamız olan Neo4j ile sinema verilerinin çizge modellemesi ve analizi anlatılmıştır. Son olarak beşinci bölümde elde edilen sonuçlar yazılmıştır ve çalışma sonuçlandırılmıştır.

Literatür taraması

Çizge teorisi, uygulamaları ve görselleştirilmesi üzerine son yıllarda oldukça yoğun bir ilgi artmıştır. Yazılım dünyasında çizge uygulamalarının etkisi hem geliştirici hem de kullanıcılar açısından büyük anlama kolaylığı sağlamaktadır. Bu nedenle hem akademik çalışmalarda hem yazılım firmalarının uygulamalarında aktif olarak kullanılmaktadır. Bu bölümde literatürden bazı önemli çalışmalara yer verilmektedir.

Zhu Z. ve diğerleri çalışmalarında karmaşık fabrikasyon ürünlerin imalatını planlamak için Neo4j tabanlı yeni bir yaklaşım önermişlerdir. Dünyadaki üretim konfigürasyonunu göz önünde bulunduran bu çalışma, iş önceliği kısıtlamaları, zaman kısıtlamaları ve stok kısıtlamaları ile esnek atölye çizgeleme problemini ele almaktadır. Bu kısıtlamaları aynı anda dikkate alabilmek için Çizge veri tabanı, anlamsal ağ ve bilgi yakalamayı içeren Neo4j tabanlı yaklaşım önerilmiştir. Çeşitlendirilmiş bağlı çizgeleme verilerini yönetmek ve incelenen çizgeleme problemini Neo4j Çizge veri tabanını kullanarak esnek Çizgelerle modellemek uygun ve verimlidir [3]. Chen A. ve diğerleri çalışmalarında Synthea aracı tarafından oluşturulan 150.000 sentetik hastayla elektronik tıbbi kayıt (EMR) veri tabanını simüle etmişlerdir. Örnek bir hedef hastalık olarak akciğer kanseri için Neo4j Çizge veri

tabanında hasta sağlık faktörü grafiği oluşturulmuştur. Çizge, faktör düğümleri ile hasta düğümleri arasında 990.000'den fazla ilişki içermektedir ve Birleşik Tıbbi Dil Sistemi (UMLS) akciğer kanseri alt grafiğine bağlanmıştır. Böyle bir entegre biyomedikal Çizge, hasta sağlık faktörlerini ve biyomedikal bilgiyi aynı Çizgeye görüntüleyebildi ve karşılaştırabildi. En üst sıralarda yer alan faktörler, bu Çizge yönteminin geçerliliğini gösteren literatürdeki raporlarla büyük ölçüde doğrulanmıştır [4]. Hu H. ve diğerleri çalışmalarında büyük veri karakteristiğine dayalı elektrik güç sistemlerinin dinamik yıldırımdan korunma yöntemi önermişlerdir. Bu yöntem temel olarak iki bölümden oluşmaktadır: Birinci bölüm, güç sisteminin büyük verilerini ve güç sisteminin dinamik düzenlenmesini analiz etmek için kullanılan Neo4j çerçeve modeli ve farklı çerçeve modellerini karşılaştırmak ve analiz etmek için kullanılan Python yazılımı; İkinci bölüm, dinamik yıldırım ve geleneksel koruma yöntemleri arasındaki karşılaştırma. Sonuçlar, Neo4j geçiş hızının Hadoop ve Spark'tan sırasıyla %87,5 ve %89,1 daha hızlı olduğunu, kümeleme etkisinin Hadoop ve Spark'tan sırasıyla %12,5 ve %17,8 daha yüksek olduğunu gösteriyor. Sonuç olarak Neo4j çerçeve modeli, güç sistemindeki büyük verinin özelliklerine daha uygundur [5]. Shi Y. ve diğerleri çalışmalarında işle ilgili suçlar için oluşturulmuş bir bilgi grafiği üzerinde çalışmışlardır. Suç vakalarının artan sayısı, savcılık organlarının çalışmalarına büyük zorluklar getirdi. Aynı zamanda, geleneksel veri tabanları büyük ölçekli, yapılandırılmamış ve karmaşık dinamik verilerle uğraşırken giderek daha dezavantajlı hale geldi. Çıkarılan bilgileri depolamak ve işle ilgili suç vakaları için bir bilgi grafiği oluşturmak üzere Neo4j Çizge veri tabanını kullanarak, eldeki verilerin görselleştirilmesini ve derinlemesine madenciliğini kolaylaştırdılar. Savcılık organlarının çalışmaları için suç vakalarını analiz ederek yeni bir yol sundular [6]. Kuhn M. ve diğerleri çalışmalarında statik ve dinamik veri alt modellerini, bağlantılı tek bir izlenebilirlik grafiğinde birleştiren Çizge tabanlı bir izlenebilirlik modeli geliştirmişlerdir. Akıllı üretimde, artan miktarda heterojen veri girişinin bütünsel bir izlenebilirlik modeline entegre edilmesi gerekir. Temel zorluklardan biri, gerçek zamanlı izleme amaçları için dinamik ve olaya dayalı sensör verilerinin, çoğunlukla geriye dönük izleme amaçları için gerekli olan statik verilerle tutarlı bir şekilde eşleşmesidir. Bir otomotiv kullanım senaryosu için yeni izlenebilirlik modeli uygulanmıştır. Neo4j Çizge veri tabanına ve Apache Kafka yazılımına dayalı hibrit bir mimari kullanılarak test edilmiştir [7]. Lu H. ve diğerleri çalışmalarında film verilerine odaklanarak Neo4j tabanlı analiz yapılmıştır. İlk olarak Neo4j ve Cypher Query Language tanıtılmışlardır. Daha sonra film verilerindeki yönetmenler, oyuncular vb. gibi anahtar nesnelere arasındaki ilişkileri analiz etmişlerdir. Neo4j veri tabanı karmaşık ve çok bağlantılı verilerle başa çıkmada iyidir, film verilerini depolamak ve yönetmek için Neo4j veri tabanını kullanmak film verilerinin analizini kolaylaştırmaktadır [8]. Shuai Q. Ve diğerleri çalışmalarında film kültürü alanı için, kullanıcıların film kültürüyle ilgili sorunları hızlı ve doğru bir şekilde sorgulamasına yardımcı olabilecek akıllı bir Çince soru ve yanıtlama sistemi oluşturuyor. Öncelikle film kültürünün bilgi grafiği oluşturulmuş ve veri depolamak için Neo4j Çizge veri tabanı kullanılmıştır. Daha sonra, kullanıcının sorunlarını sınıflandırmak için saf Bayes modeli kullanılır. Son olarak,

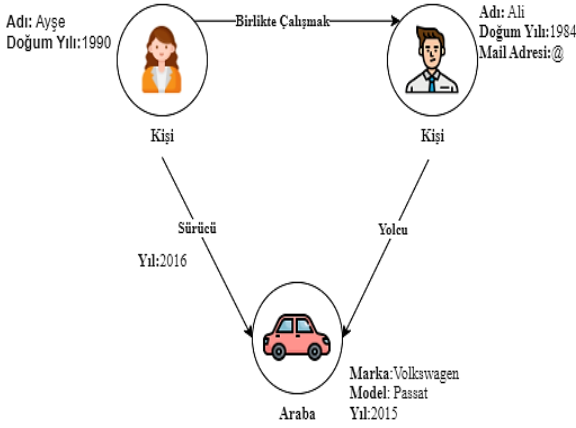
kullanıcının niyetine ve anahtar kelimelerine göre sorular bilgi grafiği sorgu ifadelerine dönüştürülür ve veri tabanı sorgulamasından sonra cevaplar döndürülür [9]. Yi N. ve diğerleri çalışmalarında Çizge veri tabanına dayalı film öneri sistemi tasarımı ve uygulaması yapmışlardır. Bu çalışmada uygulanan film tavsiye sistemi, geleneksel kullanıcı tabanlı işbirlikçi filtreleme algoritmasına dayanmaktadır ve kullanıcı projesi puanlama matrisi önceden doldurulmuştur. Aynı zamanda, bu sistemin veri tabanı teknolojisi, karmaşık ilişkilerle başa çıkmada iyi olan Çizge veri tabanını kullanır. Veri görselleştirmede, kullanıcı deneyimini iyileştirmek için bir filmin öneri derecesi, düğümün boyutu ve kenarın kalınlığı ile ifade edilir [10]. Goyanı M. ve diğerleri çalışmalarında film öneri sistemine ilişkin inceleme yapmışlardır. Bu çalışmada film önerisi için son teknoloji İçerik Tabanlı Filtreleme, İşbirlikçi Filtreleme, Hibrit Yaklaşım ve Derin Öğrenme Temelli Yöntemleri inceledik. Farklı benzerlik ölçülerini de incelemişlerdir. Arkadaş tavsiyesi veren Facebook, iş tavsiyesi LinkedIn, müzik tavsiyesi Pandora, Netflix film tavsiyesi, Amazon ürün tavsiyesi gibi birçok firma tavsiye sistemini karlarını artırmak ve müşterilerine fayda sağlamak için kullanmaktadır. Bu makale esas olarak film tavsiyesi için farklı tekniklerin ve yöntemlerinin kısa bir incelemesine odaklanmaktadır [11]. Raghavendra C. Ve diğerleri çalışmalarında film öneri sistemleri için benzerliğe dayalı işbirlikçi filtreleme modeli uygulaması yapmışlardır. Bu çalışmada, kullanıcı tabanlı ve öge tabanlı filtreler kullanarak filmler için öneri sistemi geliştirmiş ve MovieLens veri kümesi dikkate alınarak öneri görevlerinde uygulanan çeşitli benzerlik ölçütlerinin performansı karşılaştırılmıştır [12].

Çizge veri tabanı

Geleneksel veri tabanlarının uygulama alanlarındaki gereksinimleri karşılama konusundaki sınırlamaları, Graf ya da çizge veri tabanı adı verilen teknolojilerin ortaya çıkmasına yol açmıştır. Çok büyük ölçüde ve aralarındaki ilişkilerin karmaşık olduğu verilerin gün geçtikçe artması Çizge veri tabanlarının kullanımını şart haline getirmektedir. Graflar ile verilerin incelenmesi ve analizi birçok farklı disiplin ve alt disiplinde uygulanmaktadır. Böylece iletişim ağlarında optimum yolların seçimi, nesnelere arasındaki ilişkilerin tanımlanması, sistemi oluşturan bileşenlerin temsili gibi çok sayıda farklı problemin aşılmasına ve/veya çözülmesine olanak sağlar. Bilgisayar bilimlerinden fizik, kimya ve biyolojiye, hatta ekonomiden tarihe kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir [13]. En genel ifade ile çizge modelleme varlıkların temsillerinin ve bu varlıkların arasındaki ilişkilerin düğüm ve çizgi kullanarak gösterilmesidir.

Çizge, kenarlardan ve tepe noktalarından oluşan bir veri yapısıdır [14]. Çizge veri tabanı teknolojisi, bir veri modelinin tasarımında varlıklar arasındaki ilişkiye odaklanma önemli bir etken olduğundan, verileri modellemek için etkili bir araçtır [15]. Nesnelere ve aralarındaki ilişkileri modellemek, hemen hemen her şeyin karşılık gelen bir Çizgeye temsil edilebileceği anlamına gelmektedir. Çizge veri tabanı, yoğun ve birbirleriyle ilişkili veri kümelerinin verimli bir şekilde işlenmesi için optimize edilmiştir [14]. Bu tasarım, tahmine dayalı modellerin oluşturulmasına ve korelasyonların ve modellerin saptanmasına izin verir [15]. Tüm düğümlerin ilişkilerle birbirine bağlandığı bu son derece

dinamik veri modeli, köşeler arasındaki kenarlar boyunca hızlı geçişlere izin verir. Geçişlerin yerleştirilmiş olması ve alakasız veri kümelerini hesaba katmak zorunda olmaması özel bir avantajdır [16]. Şekil 2’de insanlar ve nesnelar arasında bulunan ilişkileri temsil eden örnek bir graf model yer almaktadır. Graf, düğümler ve bu düğümler arasındaki ilişkilerden oluşan bir nesnedir. Her düğümün kendine ait özellikleri vardır ve yine özellikleri bulunan ilişkiler tarafından organize olup, düzenlenirler. Graflarda ilişkilerin yönünü belirten oklar bulunur. Şekil 3’te bir grafın ayrı ayrı bileşenleri yer almaktadır ve bu bileşenlerin aralarında nasıl bir ilişki bulunduğunu gösteren bir örnek bulunmaktadır.



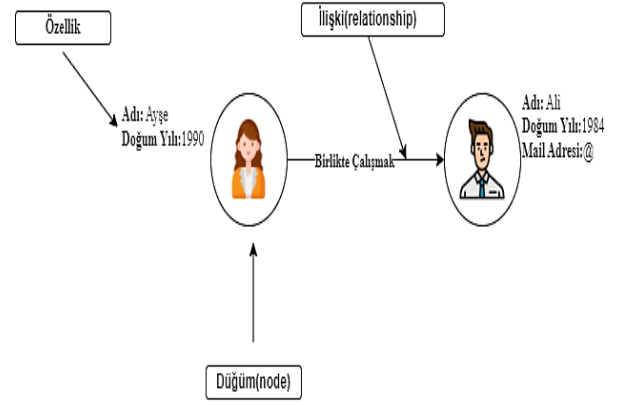
Şekil 2. Örnek graf model görünümü

Yazılımcıların, kodlama aşamasına geçmeden önce veri modelini sabitlemek yerine veri modelinin artarak değiştiğini düşüncelerini sağlayacak bir araca sahip olmaları gerekmektedir. Graf veri tabanları, mevcut bulunan sorgularda bir değişikliğe gitmeden yeni ilişkilerin, düğümlerin ve özelliklerin eklenebilmesine izin vermektedir. Yeni verilerin daha kolay eklenebilmesi daha karmaşık sorgulamanın yapılabilmesine de imkân tanır. Temel veri modelinde herhangi bir değişiklik olması halinde geçişler daha kolaydır. Graf veri tabanlarında şema bulunmadığından, şemalar veri tabanı uygulaması tarafından belirlenir ve bu sayede daha hatasız olarak doğrulanırlar.

Neo4j çizge veritabanı

Neo4j, Nosql ve ilişkisel veri tabanlarının en güçlü yanlarını bünyesinde bulunduran çok büyük sayıda veri ve veri ilişkilerinden oluşan, graph veri tabanıdır. Neo4j veri tabanı, matematikte yer alan graph teorisinden esinlenilmiş ağ odaklı bir veri tabanıdır. İlişkisel ve nosql veri tabanlarının güçlü yönlerini birleştirmek hedeflenmiştir. Verileri tablolar yerine ağlarda yapılandırılmış durumda depolamaktadır. Neo4j, ACID (Atomicity, Consistency, Isolation, Durability) prensiplerini barındıran bir veri tabanıdır. Yapılan işlemlerden herhangi bir işlemin başarısız gerçekleşmesi durumu ile karşılaştığında veri tabanının durumunu değiştirmeden bırakarak atomikliği sağlamaktadır. Veri tabanında yapılan herhangi bir değişiklik verilere zarar vermez veya yok etmez böylece tutarlılığı sağlamaktadır. Gerçekleştirilen bir işlem sonucu değişen veriler, işlenene

Graf veri tabanları, veri bağlantısı veya topoloji hakkındaki bilgilerin önemli olduğu alanlarda çalışırken ciddi derecede ön plana çıkmaktadır. Bu tür uygulamalarda veri ile verinin kendisi arasındaki ilişkiler genellikle aynı düzeydedir [17]. Graf veri tabanları sosyal graflarda, öneri sistemlerinde, bioinformatik vb. alanlarda kullanılabilir. Yeni nesnelar ile kullanıcının daha önce ilgilendiğini belirttiği nesnelar arasındaki ilişkilere bakılarak kullanıcıya ürünler önerilebilir. Esneklik ve hızlilik, iş gereksinimlerinin devamlı olarak değiştiği günümüzde en önemli unsurlardandır



Şekil 3. Örnek graf bileşenleri

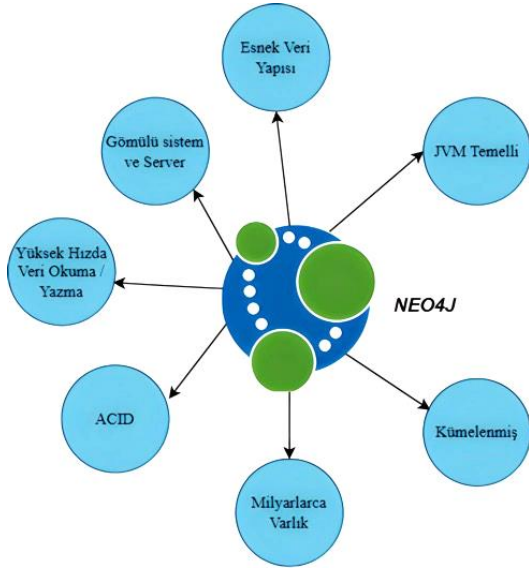
kadar diğer işlemlerden yalıtılır ve böylece izole edilmesi sağlanır. Neo4j kalıcı bir Çizge veri tabanı olması nedeniyle, taahhüt edilen bir işlemin çıktılarını her koşulda alınabilir, bu sayede dayanıklı olması sağlanmaktadır.

Her ilişkinin bir ilişki türü olmalıdır. İlişkilerde, özellikler bir anahtar/değer çifti olabilir. Hem düğümler hem de ilişkiler özelliklere sahip olabilir, bu özellikler ilişkileri ölçekbilir. Bir düğüm için sıfır veya daha fazla etiket atanabilir. Bu etiketler rolleri, kategorileri veya türleri temsil etmek için kullanılan etiketlerdir. Düğümlerin indekslerini ve kısıtlamalarını tanımlamak için kullanılır. Neo4j veri tabanı, Çizge veri tabanının daha hızlı ve verimli bir şekilde sorgulanmasına, güncellenmesine ve silinmesine olanak tanıyan bir sorgulama dili olarak cypher'ı kullanır [18]. Cypher sorgulama dili bir Çizgeten hangi bilgilerin alınması gerektiğine odaklanır. Kullanım olarak basit bir dil olsa da çok güçlü bir sorgulama dildir. Karmaşık veri tabanı sorguları kolayca Cypher sorgulama dili ile yazılabilir. Şekil 4’te Neo4j’nin genel özellikleri yer almaktadır. Şekil 5’te ise Neo4j bileşenleri ve bu bileşenler arasındaki ilişkiler gösterilmiştir. Neo4j çizge veri tabanının önemli özellikleri aşağıda sıralanmıştır.

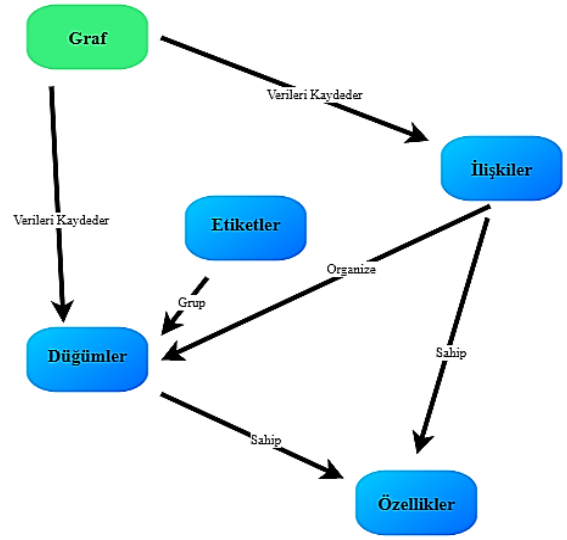
- Kolay ve esnek bir veri yapısına sahip olması nedeniyle uygulamanın ihtiyaçlarına göre kolayca şekillendirilebilir bir yapıdadır.
- Gerçek verilere dayanan sonuçlar sunmaktadır.
- Şemalar içermez, bağlantılı verilerin düğümler ile basit temsilini sunar.

- Çizgeleri yerel olarak depolayıp işlediği için yüksek performans gösterir.
- Muadil veri tabanlarına göre daha hızlı sonuçlar üretir ve düğümler arasında daha hızlı bir geçiş/gezime imkanı sunar.
- ASCII-art sözdizimi kullanılarak Çizge olarak görselleştirmek için Cypher sorgulama dili kullanılır. Cypher sorgulama dilinin komutlarının anlaşılması ve okunması kolaydır.

- Neo4j en büyük ve aktif bir Çizge topluluğuna sahiptir.
- Veri bütünlüğü korunurken yüksek hızda okuma ve yazma performansı sunmaktadır.
- Eğitim ekosistemi, eğitim materyali ve yazılmış kitaplar sayesinde kolay öğrenilebilir.
- Düşük bellek kullanımı ile büyük veri boyutlarını yüksek hızda içe aktarır.



Şekil 4. Neo4j veritabanı genel özellikler



Şekil 5. Neo4j veritabanı bileşenleri ve ilişkiler

Metodoloji ve uygulama

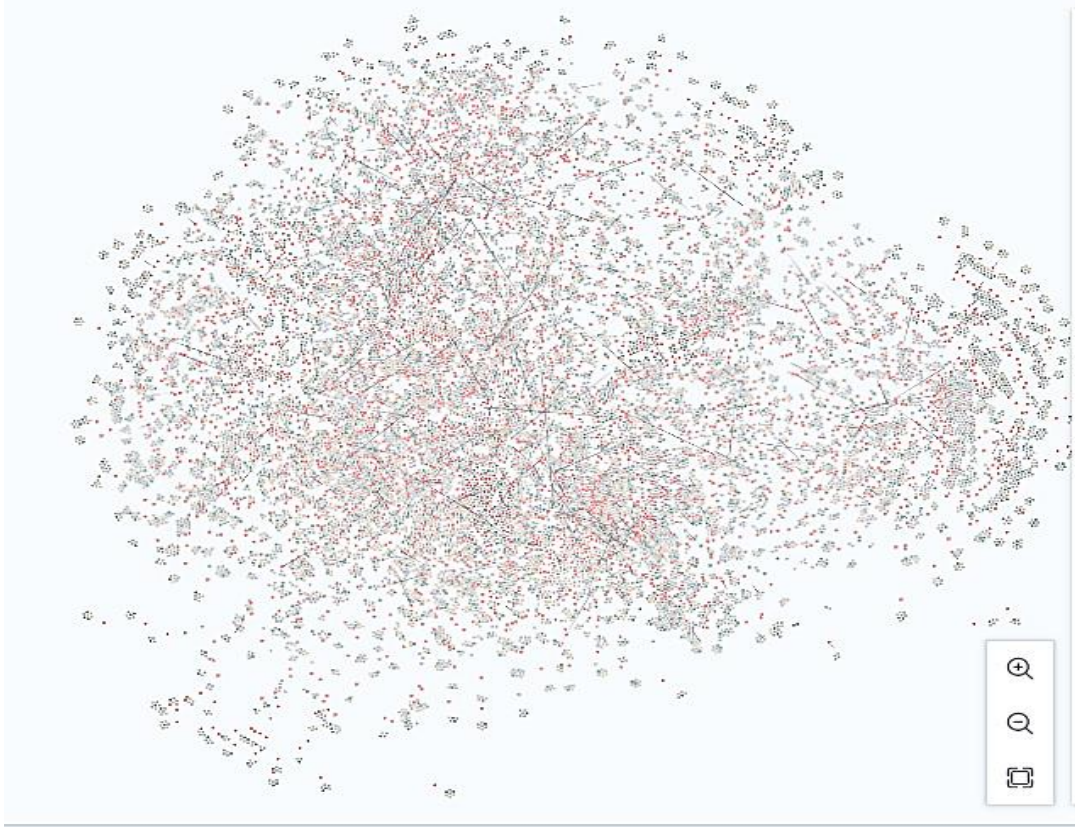
Neo4j'de veri modeli düğüm, düğümler arası ilişkiler ve özelliklerden oluşmaktadır. Düğümler nesnelere ve düğümler farklı ilişkilerle birbirine bağlıdır. Çalışmamızda film bir düğümdür. Filmin türü, vizyon tarihi vb. bilgiler ise filmin özellikleridir. Filmler, yönetmenler ve oyuncular depolanacak olan farklı varlıklardır. Veri tabanında saklanması gereken yalnızca farklı varlıklar değildir, bu varlıklar arasındaki ilişkilerin de veri tabanında depolanması gerekmektedir.

Neo4j'de veri tabanı oluşturmak kolaydır. Düğümleri, ilişkileri ve ilişkiler arası özellikleri veri tabanına eklemek yeterlidir. Aşağıdaki örnekte film verilerinin yer aldığı örnek bir Neo4j veri tabanının nasıl oluşturulacağı yer almaktadır. Şekil 6'da örnek kod bloğu, Şekil 7'de kod bloğunun çıktısı yer almaktadır. Şekil 8'de örnek filme ait özellikler yer almaktadır.

```
neo4j$
1 CREATE (RafadanTayfaGalaktikTayfa:Movie {title:'Rafadan Tayfa Galaktik Tayfa', released:2023, genre:'Animasyon',
2 number_Spectators:'2746254', total_Revenue:
3 164255567, IMDb:6.1, week:7, country:'Türkiye'})
4 CREATE (ISFFilmProdüksiyon:Yapımcı {name:'ISF Film Prodüksiyon'})
5 CREATE (ŞirinGiobi:Oyuncu {name:'Şirin Giobbi'})
6 CREATE (LeventKol:Oyuncu {name:'Levent Kol'})
7 CREATE (EmineSergenKazbek:Oyuncu {name:'Emine Sergen Kazbek'})
8 CREATE
9 (ŞirinGiobi)-[:Oyuncu]→(RafadanTayfaGalaktikTayfa),
10 (LeventKol)-[:Oyuncu]→(RafadanTayfaGalaktikTayfa),
11 (EmineSergenKazbek)-[:Oyuncu]→(RafadanTayfaGalaktikTayfa),
12 (ISFFilmProdüksiyon)-[:Yapımcı]→(RafadanTayfaGalaktikTayfa)
```

Şekil 6. Uygulamanın Neo4j örnek kesit kod bloğu

Şekil 9. Film veri tabanı limitli sorgu sonucu



Şekil 10. Film veri tabanı limitsiz sorgu sonucu

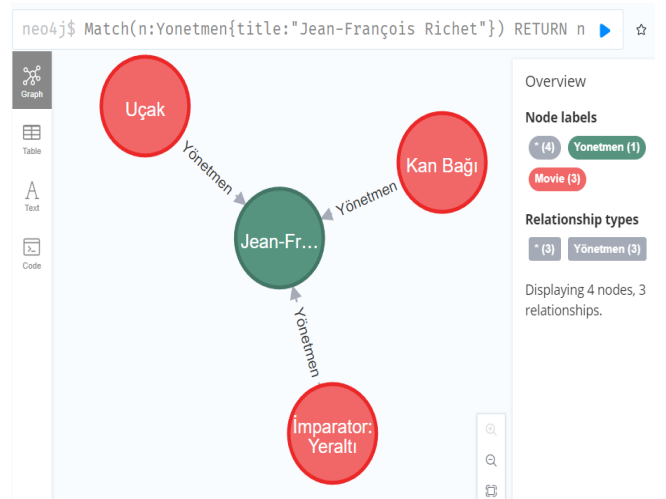
Filmin sadece adı bilindiğinde ve diğer özellikleri sorgulanmak istendiğinde, düğümün özelliklerinin sorgulanması gerekir. Bir düğümün özellikleri sorgulanmak istendiğinde kullanılacak Cypher sorgusu Şekil 11’de yer almaktadır. Şekil 12’de ise sorgunun sonucu bulunmaktadır.

```
1 Match (n:Movie)
2 Where n.title="Mumyalar"
3 Return n, n.released
```

Şekil 11. Örnek Cypher sorgusu ve çıktısı



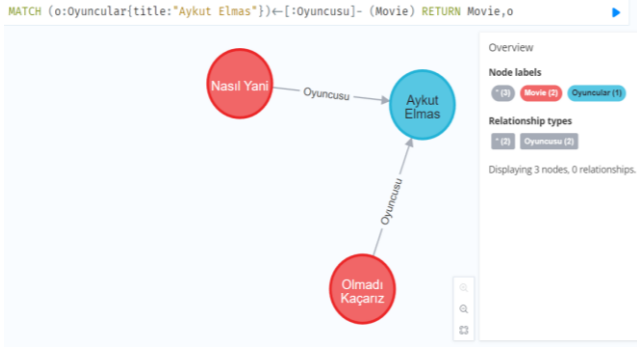
Şekil 12. Örnek Cypher sorgu sonucu



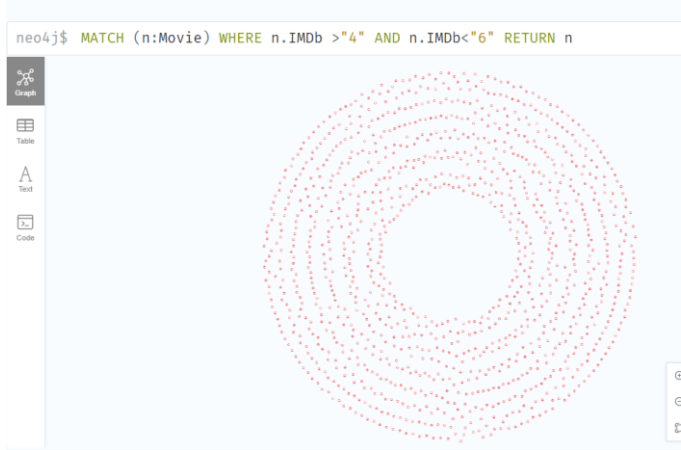
Şekil 13. Örnek yönetmenin yönettiği filmler sorgu sonucu

Şekil 13’te örnek bir yönetmen adı girilerek veri tabanında yönettiği filmleri tek bir sorgu ile bulabiliriz. Örnek koddaki “Jean-François Richet” adlı yönetmenin ülkemizde son 10 yılda gösterime giren 3 filmde yönetmenlik yaptığı görüntülenmektedir. Şekil 14’te ise örnek bir oyuncu adı girilerek veri tabanında oynadığı 2 film görüntülenmektedir. Şekil 15’te IMDb puanı 4 ve 6 arasında olan filmleri görüntülemekteyiz. Veri tabanımızda IMDb puanı 4 ve 6 arasında olan 1175 filmin yer aldığını görüntülemekteyiz. Limit değerini sorguda 10 girerek IMDb puanı 4 ve 6 arasında

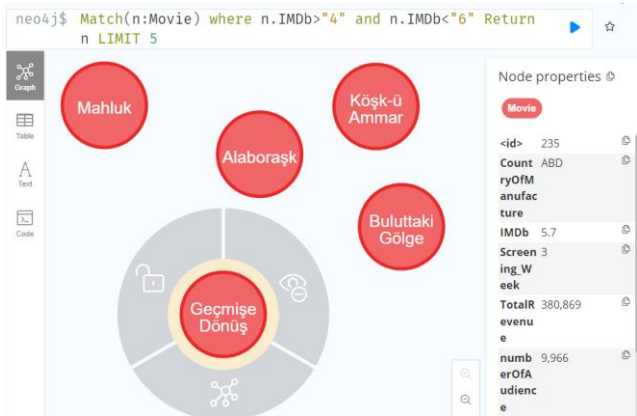
olan ilk 10 filmi görüntülenebilir. Bu filmlerden birini seçerek sorgu sonucu doğrulanmaktadır. Şekil 16'da limit değeri 5 verilerek "Geçmişe Dönüş" isimli filmin IMDB puanının "5.7" ve 4-6 aralığında olduğu görüntülenmektedir. Şekil 17'de 8 haftadan fazla gösterimde kalan filmler sorgulanmaktadır. Sorgu sonucunda veritabanında 8 haftadan fazla gösterimde olan film sayısının 162 olduğu görülmektedir. Şekil 18'de örnek olarak "Taşyıcı Son Hız" filmine bakıldığında 9 (dokuz) hafta gösterimde kaldığı görülmektedir.



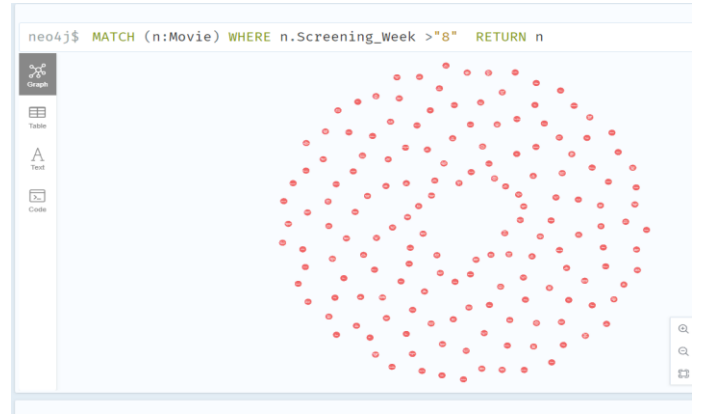
Şekil 14. Örnek oyuncu ve oynadığı filmler sorgu sonucu



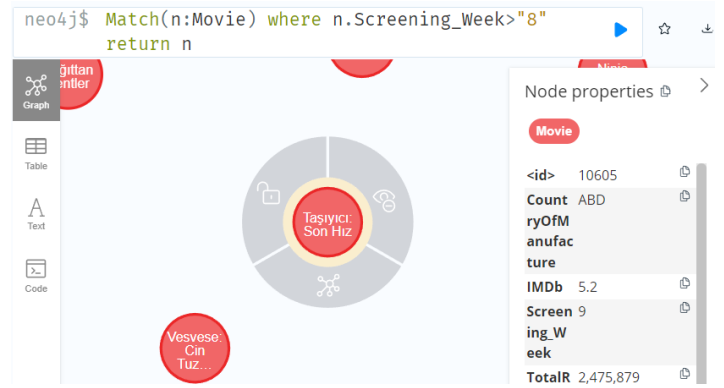
Şekil 15. IMDB puan sorgu sonucu



Şekil 16. IMDB puan limitli sorgu sonucu

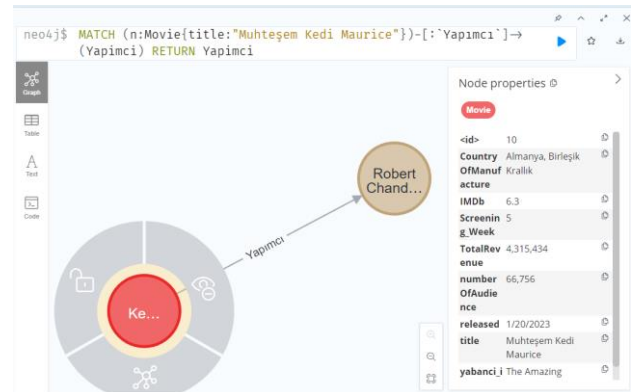


Şekil 17. Gösterim haftası sorgu sonucu



Şekil 18. Gösterim haftası detaylı sorgu sonucu

Bir film adı girilerek o filmin sadece oyuncusu veya sadece yapımcısı vb. özellikleri bulunabilmektedir. Şekil 19'da örnek bir film adı girilerek yapımcısı sorgulanmıştır. Veritabanında bulunan filmler türlerine göre sınıflandırılabilir. Şekil 20'de örnek olarak film türü dram olan filmler sorgulanmıştır ve sorgu sonucu olarak türü dram olan 1276 adet film bulunmuştur.



Şekil 19. Örnek Cypher sorgu sonucu

Çalışmada kullandığımız veri tabanımızın veri profilini Neo4j ile görüntüleyebilmekteyiz. Veritabanında 16265 düğüm ve 25787 ilişki bulunmaktadır.

```
neo4j$ MATCH (n:Movie)-[:`FilmTürü`]→ (f:Film_Turu{title:"Dram"}) RETURN n.title,f.title
```

n.title	f.title
"Kabile"	"Dram"
"Hile Yolu"	"Dram"
"Sıradışı Anne"	"Dram"
"Birdman veya (Cahilliğin Umulmayan Erdemi)"	"Dram"
"Gece Hayvanları"	"Dram"
"Para Tuzağı"	"Dram"

Started streaming 1276 records after 3 ms and completed after 8 ms.

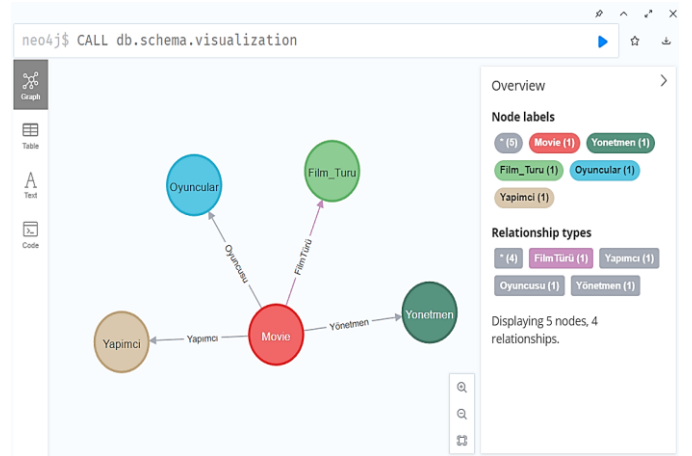
Şekil 20. Örnek film türü sorgu sonucu

```
neo4j$ MATCH (n) RETURN count(n)
```

count(n)
16265

Şekil 21. Düğüm sayısı sorgu sonucu

Şekil 21 ve Şekil 22’de sorgu sonuçları görüntülenmektedir. Şekil 23’te veriler arasındaki şema sorgulanmıştır ve sorgu sonucunda oluşan şema yer almaktadır. Çalışmamızda 5 adet düğüm vardır ve Şekil 24’te sorgulanmış düğüm etiket listesi yer almaktadır.



Şekil 23. Veri şeması sorgu sonucu

```
neo4j$ MATCH ()→() RETURN count(*)
```

count(*)
25787

Şekil 22. İlişki sayısı sorgu sonucu

```
neo4j$ CALL db.labels()
```

label
"Movie"
"Yapımcı"
"Yönetmen"
"Film_Turu"
"Oyuncular"

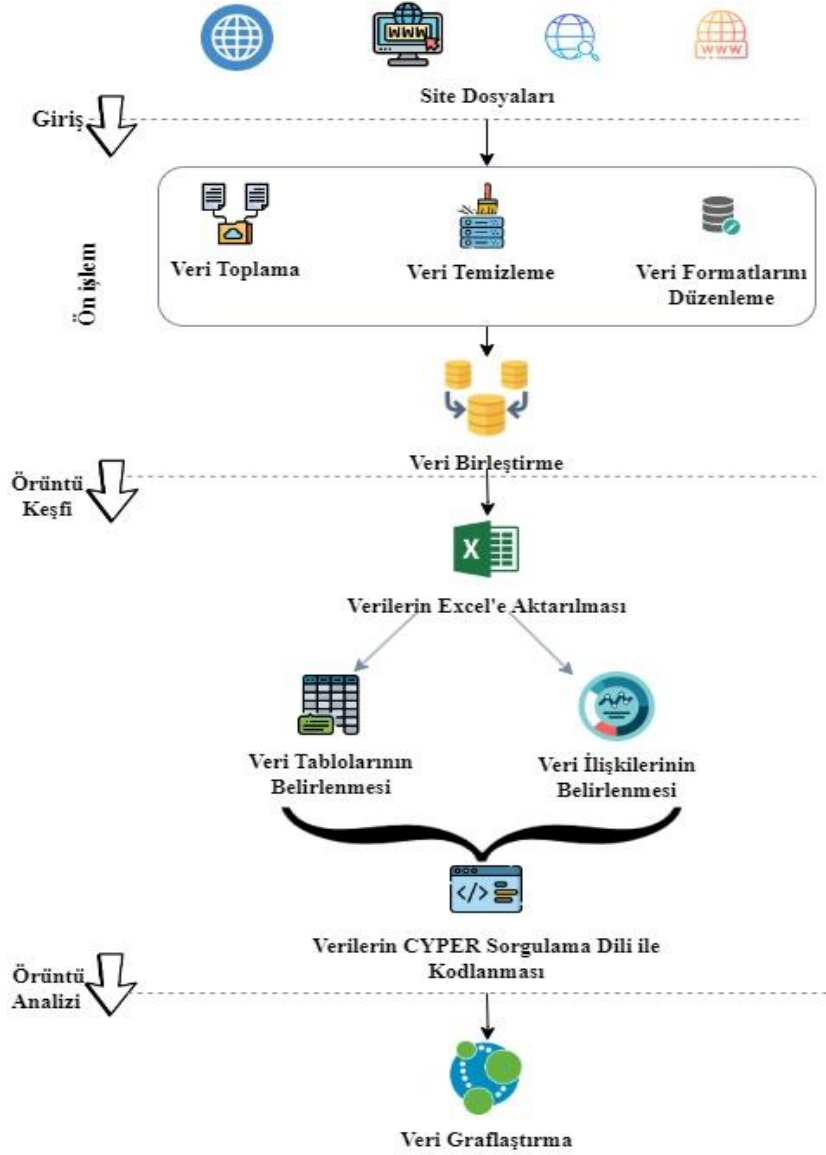
Started streaming 5 records after 2 ms and completed after 2 ms.

Şekil 24. Düğüm etiket listesi sorgu sonucu

Çalışmada izlenen uygulama adımları giriş, örüntü keşfi ve örüntü analizi olmak üzere 3 adımda incelenerek bu aşamalar Şekil 25’te yer almaktadır. Giriş bölümünde verilerin nasıl ve nereden bulunduğu gösterilmektedir. Ön işlem aşamasında,

web sitelerinde bulunan karmaşık düzensiz verilerin belirli bir düzen içerisinde kullanıma hazır hale getirmek için arındırılması, temizlenmesi ve dönüştürülmesi aşamaları gösterilmiştir. Verilere uygulanan bu işlemler sonrasında elde edilen kullanılacak olan veriler birleştirilmiştir. Birleştirilen

veriler Excel dosyasına aktarılmıştır. Bu verilerin tabloları ve veriler arasındaki ilişkiler belirlenmiştir. Veriler CYPHER sorgulama dili kodlanarak Neo4j veri tabanına aktarılmıştır.



Şekil 25. Neo4j çizge veritabanı ile sinema verilerinin çizge modellenmesinin uygulama adımları

Veri toplanması

Büyük ölçekli film verilerini elde etmek zorlu bir süreçtir. Bulunan verilerin içerisinde ilgili kısımları elde etmek daha zor bir süreçtir. Elde edilen bu verilerin anlaşılabilirliği ayrı bir zorluktur. Öncelikle verilerin toplanmasında hangi kaynaklardan hangi türlü verilerin toplanacağı belirlenmelidir. İlk zorluk hangi verilerin toplanacağına karar vermektir.

Veri temizlenmesi

Karmaşık ve büyük ölçekli film verilerinin toplanmasından sonraki adım, verilerin temizlenmesi ve kullanılabilir hale getirilmesidir. Farklı formatlarda ve büyük boyutlarda çeşitli parametreler bu film verilerinin temizlenmesi oldukça zor bir

süreçtir. Elde bulunan bu veriler Neo4j veri tabanına aktarılmadan önce temizlenmeli ve hazırlanmalıdır. Geçersiz, eksik ve tutarsız verileri düzenlemek için birçok yaklaşım bulunmaktadır. Bu sorunlu kayıtlardaki eksik değerleri bulmak veya verileri normalleştirmek faydalı bir yaklaşımdır.

Veri organizasyonu

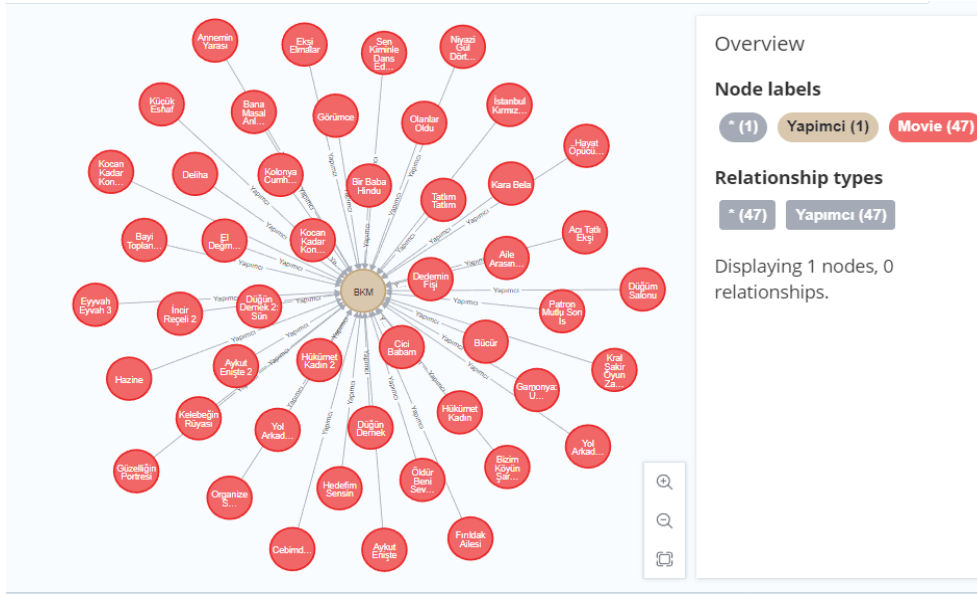
Film verilerini düğüm ve kenar şeklinde tanımlanır. Bu tanımlama veri anlaşılabilirliğini mümkün kılacaktır. Film verileri, oyuncular, yönetmenler, yapımcılar ve bunların arasındaki ilişkilerden oluşur. Film adı, yönetmen, aktörler vb. özellikler düğüm olarak kullanılır ve toplam hasılat, seyirci sayısı, gösterim yılı vb. özellikler varlıkların nitelikleri olarak kullanılır.

Çizge görselleştirme

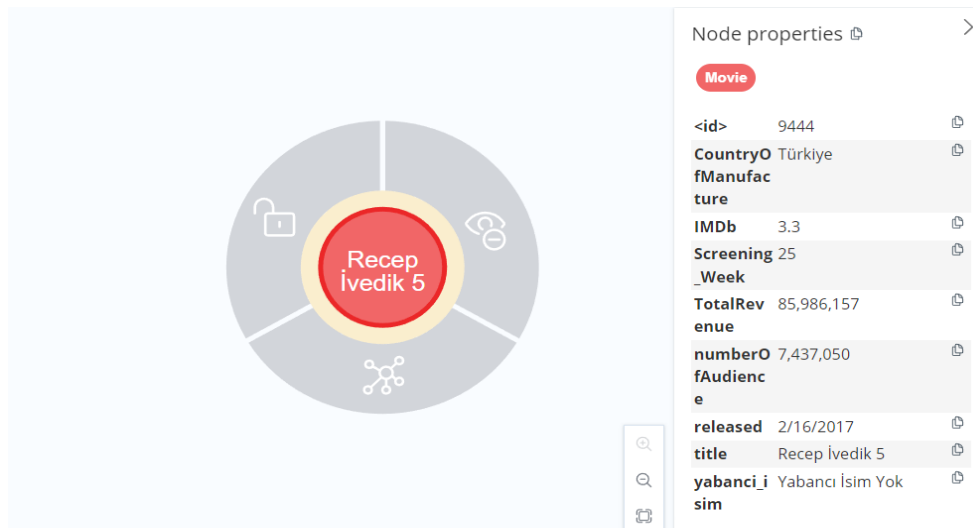
Çizge görselleştirme aşamasında önemli görülen belirli özellikleri vurgulamak için çeşitli teknikler kullanılabilir. Grafiğin anlaşılmasını geliştirmek için renklendirme, soldurma ve etiketleme gibi teknikler kullanılabilir [21]. Veri toplama, temizleme ve verilerin organizasyonu adımlarından sonra film bilgileri, oyuncular, yapımcılar ve diğer faktörleri içeren bilgi grafiği ve veri görselleştirme işlemi yapıldı. Veri görselleştirme işlemi için Neo4j veri tabanı kullanıldı. Kırmızı düğümler filmleri, yeşil düğümler yönetmenleri, gri düğümler oyuncuları ve kahverengi düğümler yapımcıları temsil etmektedir. Film verileri toplamak için 01.01.2013 - 13.03.2023 tarihleri arasında Türkiye’de gösterime girmiş filmler araştırıldı, elde edilen sonuçlar incelendi. İnceleme sonrası çalışmada kullanılacak film verilerine karar verildi ve gereksiz veriler silme, veriler arasındaki gereksiz boşluklar

kaldırma vs. işlemlerden geçirilerek veriler temizlendi. Veri tabanının düğüm ve aralarında hangi ilişkiler olacağı belirlenerek veri organizasyonu gerçekleştirildi.

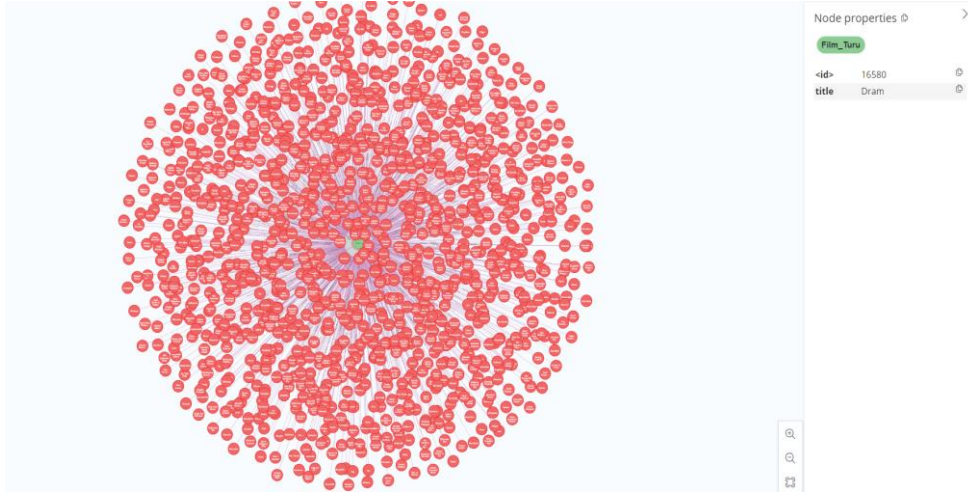
Çalışmamızda literatürden farklı olarak veri tabanında 01.01.2013 - 13.03.2023 tarihleri arasında Türkiye’de gösterime girmiş sinema filmleri yer almaktadır. Film analizleri sonucunda ele alınan yıllar arasında en çok film yapan yapımcı 47 film ile “BKM” olmuştur ve sorgu sonucu Şekil 27’de yer almaktadır. En fazla filmin gösterime girdiği yıl 429 film ile 2018 yılı olmuştur. Çalışmada kullanılan tarihler arasında en fazla seyircisi olan film 7437050 kişi ile “Recep İvedik 5” olmuştur, sorgu sonucu Şekil 27’de yer almaktadır. En fazla gösterime giren film türü 1276 film ile “Dram” türü olmuştur ve sorgu sonucu Şekil 28’de yer almaktadır.



Şekil 26. En çok film yapan yapımcı



Şekil 27. En fazla seyircisi olan film



Şekil 28. Gösterime giren en fazla film türü

Sonuç

Günümüzde her alanda olduğu gibi film sektöründe de veriler katlanarak büyümektedir, bu verilerin arasındaki ilişkiler de giderek daha karmaşık bir hale gelmektedir. Genellikle sadece verinin kendisine odaklanmak değil, verilerin arasında yer alan ilişkilere de odaklanmak gerekmektedir. Geleneksel veri tabanları bu talepleri karşılayamamaktadır. Sinema film verilerini depolamak ve bu verileri yönetmek için Neo4j veri tabanını kullanmak, bir film web sitesi için kullanıcıların gereksinimlerini karşılamak ve ilgi alanlarını bulmak gibi işlemleri kolaylaştırır. Verilerin yönetimi söz konusu olduğunda, Neo4j veri tabanının NoSQL veya MYSQL veri tabanlarına güçlü bir alternatif olacağı sonucuna varabiliriz. Daha önce de belirtildiği gibi, verilerin yönetimi ve alımı, istenilen çıktıyı elde etmek için çok hızlı ve görsel olarak çok hassastır. Toplam hasılat, seyirci sayısı gibi özelliklere bakılarak yeni çıkarılacak sinema filmleri hakkında çıkarımda bulunulabilir, bu veriler yol göstermede kullanılabilir. Son yıllarda sinema sektörü için çok ciddi bütçeler ayrılarak filmler yapılmaktadır ve dolayısıyla film yapımcıları veya film sponsorları bu graf modellemelerini kullanarak daha net verilere ulaşabilir ve elde edilen veriler ışığında daha kolay yoldan seyircilerin hangi yıllarda hangi tür filmlere talep gösterdiği, hangi yönetmenin filmlerinin ya da hangi oyuncuların rol aldığı filmlerin daha çok izlendiği bilgilerine ulaşabilir. Film sektörüne yapılacak yatırımlarda nasıl bir yol izlenilmesi gerektiği konusunda yol gösterici olabilir.

Kaynakça

- [1] S. Sencer and K. Eren, "Graph Database for Agent Based Emergency Response Model", Proceedings of the 2014 international conference on advances in big data analytics, July 21-24, 2014.
- [2] M.Sülü, R. Daş, "Graph visualization of cyber threat intelligence data for analysis of cyber attacks", Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering (BAJECE), (2022),10(3), 300-306.
- [3] Z. Zhu X.Zhou, K. Shao, A novel approach based on Neo4j for multi-constrained flexible job shop scheduling problem. Computers & Industrial Engineering, 2019, 130: 671-686.
- [4] A. Chen, A novel graph methodology for analyzing disease risk factor distribution using synthetic patient data. Healthcare Analytics, 2022, 2: 100084.
- [5] H. Hu, M. Fang, Y. Zhang, L. Jing and F. Hu, "Dynamic lightning protection method of electric power systems based on the large data characteristics", Int. J. Elect. Power Energy Syst., vol. 128, no. 1, pp. 1-14, 2021.
- [6] Y. Shi, et al. A knowledge graph constructed for job-related crimes. Procedia Computer Science, 2022, 199: 540-547.
- [7] M. Kuhn, E. T. Kaminski and J. Franke, "Track and Trace: Integrating static and dynamic data in a hybrid graph based traceability model", Procedia CIRP, vol. 112, pp. 250-255, 2022.
- [8] H. Lu, Z. Hong and M. Shi, "Analysis of film data based on Neo4j", 2017 IEEE/ACIS 16th International Conference on Computer and Information Science (ICIS), pp. 675-677, 2017.
- [9] Q. Shuai and C. Zhang, "Question Answering system based on Knowledge Graph of Film Culture", 2020 International Conference on Culture-oriented Science & Technology (ICCST), pp. 150-153, 2020.
- [10] N. Yi, C. Li, X. Feng and M. Shi, "Design and implementation of movie recommender system based on graph database", 2017 14th Web Information Systems and Applications Conference (WISA), pp. 132-135, 2017.
- [11] M. Goyani and N. Chaurasiya, "A Review of Movie Recommendation System", ELCVIA: electronic letters on computer vision and image analysis, vol. 19, no. 3, pp. 18-37, 2020.
- [12] C. K. Raghavendra and K. C. Srikantaiah, "Similarity Based Collaborative Filtering Model for Movie Recommendation Systems", 2021 5th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), pp. 1143-1147, 2021.
- [13] R. Das and M. Soylu, "A key review on graph data science: The power of graphs in scientific studies", Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, c. 240, sy 104896, Haz. 2023
- [14] M. Rodriguez, A. Marko and P. Neubauer, "Constructions from dots and lines", Bulletin of the American Society for

- Information Science and Technology, vol. 36, no. 6, pp. 35-41, 2010.
- [15] A. Silvescu, D. Caragea and A. Atramentov, "Graph Database", Artificial Intelligence Research Laboratory Department of Computer Science Iowa State University, 2012,
- [16] M. A. Rodriguez and P. Neubauer. The graph traversal pattern. Graph Data Management: Techniques and Applications, 2011.
- [17] C. Berge, The theory of graphs. Courier Corporation, 2001.
- [18] G. M. D'silva, S. Thakare and V. A. Bharadi, "Real-time processing of IoT events using a Software as a Service (SaaS) architecture with graph database. In: Computing Communication Control and automation (ICCUBEA)", 2016 International Conference on, pp. 1-6, 2016.
- [19] Y. Wang, "A Comparative Study of Graph Database NEO4J and Relational Database", Modern Electronic Technology, vol. 35, no. 20, pp. 77-79, 2012.
- [20] L. Wang, "Construction of Document Resources Association Network Based on graph database technology", Digital Library Forum, pp. 59-65, 2014.
- [21] M. Soylu, A. Soylu, ve R. Das, "A new approach to recognizing the use of attitude markers by authors of academic journal articles", Expert Systems with Applications, c. 230, sy 120538, Kas. 2023



Experimental Investigation of High-Frequency Effect on Ignition and Damping of Corona Discharges

İlker ARI^{1*}, Fevzi HANSU²

¹ Siirt University, Motor Vehicles and Transportation Technologies Department, ilkerari89@gmail.com, Orcid No: 0000-0002-1171-5533

² Siirt University, Electrical-Electronics Engineering Department, f_hansu@hotmail.com, Orcid No: 0000-0002-5325-5459

ARTICLE INFO

Article history:

Received 28 August 2023

Received in revised form 17 November 2023

Accepted 9 January 2024

Available online 29 March 2024

Keywords:

Electrode system, Oscillation,
Corona discharge, High frequency

ABSTRACT

The impact of high-frequency voltage/current oscillations on the corona discharge's ignition and damping in electrical networks were experimentally investigated as part of this study. Internal and external overvoltages caused by short-circuit faults or circuit opening/closing in the generation, transmission and distribution lines cause voltage/current oscillations on the lines at different frequencies. At frequencies of 50, 150, 250, 350, and 500 Hz in different electrode systems such as Sphere-Plane and Needle-Plane, the effects of these oscillations at various frequencies in the networks on the ignition and damping of corona discharges on transmission lines have been investigated. The results showed that the ignition and damping voltages of corona discharges are greatly influenced by high-frequency voltage/current oscillations, and that an increase in the frequency value significantly speeds up the corona discharge's ignition.

Doi: 10.24012/dumf.1351383

* Corresponding author

Introduction

In parallel with the rapid development of technology, efficient use of energy is gaining more and more importance day by day. Among the energies with high strategic value, electrical energy, which is the most widely used, has become one of the most popular research topics with its feature of being an indispensable energy source for human beings today. Considering the factors such as the increasing need for electrical energy in recent years, the limited energy resources and the limited number of energy types, the importance of the efficient use of electrical energy has increased significantly. The concept of increasing electrical energy efficiency can be considered as reducing losses in practical terms [1]. In this context, the issue of minimizing or completely eliminating the losses occurring in the electrical energy generation, transmission and distribution stages has taken its place among the current problems and has attracted the attention of researchers especially in recent years. In addition to trying to find new energy sources to fulfill the growing demand for energy, researchers are additionally attempting to minimize energy losses in present energy systems [2]. When the studies in the literature are examined, it is seen that the losses occurring in the intermediate systems from

the generation of the electrical energy to the consumption show a large number of variations. Therefore, it is possible to find many studies conducted in these areas. When these studies are examined, it can be seen that many issues have been clarified, but it is possible to encounter many problems that still have not been solved.

There are many factors that affect the amount of losses in electrical energy generation, transmission and distribution lines. The most important of these factors can be listed as atmospheric conditions, line length, conductor cross-section, conductor type, variety of loads connected to the network, voltage level, and ionization events on the lines [3-4].

There are various studies on corona discharge in the literature. In [5], the frequency characteristics of corona discharge in a low pressure environment have been studied. In the study, tests were carried out at different pressure values and it was concluded that the discharge current, which is an important parameter of the frequency spectrum, showed a significant change depending on the pressure. In [6], The effect of voltage and load current on DC bipolar corona pulses was examined. In the study, laboratory-scale digitizing oscilloscopes were connected to a bipolar HVDC transmission line to observe the anode

and cathode corona pulses. As a result of the study, it was found that the corona pulse amplitude increased with increasing transmission line voltage; It also has the effect of reducing the corona pulse duration for both the anode and cathode; With the addition of load current, the corona pulse amplitude decreases and the corona pulse time ratio for the anode increases; On the other hand, it has been determined that the ratio of cathode corona pulse amplitude and pulse time decreases with the addition of load current. In [7], corona losses occurring in monopolar DC transmission lines were examined. In the study, a charge simulation-based method is presented to solve the equations defining the ionized field around monopolar transmission lines. The method has been applied to calculate the current density profile between the corona power loss and ground level of conductor bundles with two and three subconductors. As a result of the study, it was seen that the corona power loss calculated for bundle conductors and the current density at ground level were in full agreement with experimental measurements. In [8], the effect of DC polarity and Alternating Current (AC) electromagnetic field intensity on corona onset voltage and corona discharge was investigated using some test objects such as high voltage needle-plane, needle-internal defect, surface discharge, headless underground cable, bare overhead conductor. Therefore, it is emphasized that the effect of the polarity of the DC transmission line on the initial voltage and discharge voltage of the corona must be determined. As a result of the study, the discharge waveform of the positive polarity measured has a larger amplitude with a single discharge pulse, while the wave width of the negative polarity has less amplitude with a higher frequency of occurrence or a higher repetition rate; It has been found that the initial voltage of positive DC is generally larger than that of negative polarity and AC voltage. In [9], experimental observations and some mathematical modeling were made by taking into account the corona discharge occurring at the ends of grounded rods, tip height, radius of curvature, magnitude and polarity of the applied electric field. As a result of the research, it has been suggested that the electric field intensity of the corona current exceeds the penetration limits in the air environment and depends on the active volume to a certain extent. Within the scope of the study, the results of mathematical modeling and experimental observations are compatible; It has been determined that the corona current depends on the rod tip height, tip radius, applied electric field strength and geometry. In [10], The effect of atmospheric humidity on corona discharges has been investigated experimentally. As a result of the study, it was determined that corona discharges occurring in transmission lines due to atmospheric humidity had a significant effect on the limit values of ignition and damping voltages; It has been observed that the current values corresponding to the ignition voltage of the discharge are directly proportional to the humidity rate in the environment, and the effect of increasing the humidity rate becomes more evident in wide electrode gaps.

When the studies in the literature are examined, it is seen that many studies have been carried out especially in the

field of visual line losses. In addition, from the point of view of ion-electron technology, it is known that corona losses constitute an important place among the current losses [11]. However, it has been observed that the studies on some important causes that form the basis of corona losses are very limited. Corona discharges, which are basically electrical discharges that occur in a certain gaseous environment, have a critical importance in terms of losses in electrical power transmission lines. In order to examine the corona losses, the mechanism of corona discharges should be well known and modeled correctly. In order to fully understand corona discharges, first of all, knowing the mechanisms of electrical discharges occurring in gases can be considered as a prerequisite [12-14].

It is considered that the effect of frequency on the limit values of corona discharge's ignition and damping voltage so is crucial and cannot be disregarded. Since discharges in the fixed range are generally capacitive, increasing the frequency value is very important for the ignition of the discharge [15-18]. The determination of the frequency parameter, which is important for the ignition and development of the discharge, is important in controlling the losses in the energy transmission lines and in eliminating the disadvantages of the harmonics at different frequencies caused by the voltage fluctuations occurring in the transmission lines due to various (internal and external) factors and the effects of the components of these harmonics.

In this study, a number of studies have been carried out to experimentally investigate the effect of high frequency voltage/current oscillations on the ignition and damping of corona discharges that occur in electrical energy transmission lines. The effect of the harmonic or current oscillations with various frequencies, on the supply voltage of corona discharges occurs on the networks have been experimentally investigated in terms of 50, 150, 250, 350 and 500 Hz frequencies at the Needle-Plane and Sphere-Plane electrode systems that corresponding to the transmission line model. By using obtained experimental measurement results, the generated Voltage-Current graphs at certain frequencies of corona discharges were interpreted comparatively. As a result of the study, high frequency voltage/current oscillations have a significant effect on the ignition and damping voltages of corona discharges, and the increase in the frequency value has facilitated the ignition of corona discharges considerably.

Materials and Methods

System description

Specially designed Needle-Plane and Sphere-Plane electrode systems, which are seen as equivalent models for some electrical equipment, were used to examine corona discharges, which cause significant losses in energy transmission systems, under laboratory conditions. Parameters such as the type of material from which these electrode systems are made, the geometric shape, the gap between the electrodes and the type of gas in the environment, the application voltage and the frequency of

the applied voltage are important for the ignition, development and damping of the discharge [19-21]. The electrode system used in the study is made of stainless steel material in the form of a circular disc with smooth surfaces. These electrodes were properly mounted on a C-shaped insulating material designed using fiberglass material, fixed with an electrode opening of 5 mm, and the necessary experiments were carried out. Experimental studies were carried out in atmospheric conditions and at room temperature.

An important part of the test system is the Needle-Plane electrode system. The distance between the tip of the needle and the plane used in this electrode system was adjusted to be 5 mm constant, and this value was used for all experiments. The diameter of the plane electrode is 25 mm and its thickness is 5 mm. The electrode system was formed by mounting the electrodes with stainless steel screws to the transparent fiberglass dielectric material of 10 mm thickness, which was cut in a C-shape in principle. The image of the designed Needle-Plane electrode system is given in Figure 1.

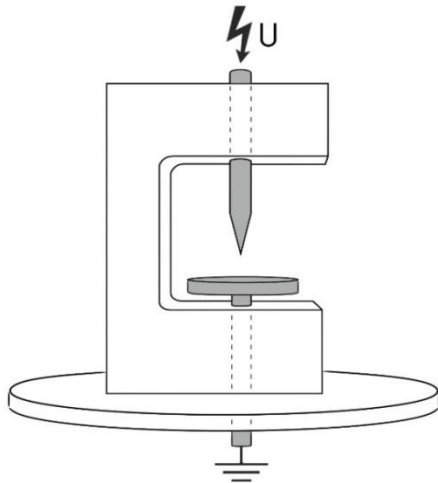


Figure 1. Needle-Plane electrode system image

Another electrode system used in the study is the Sphere-Plane electrode system. The diameter of the sphere used in this electrode system is 15 mm and is made of stainless iron material. The plane electrode is made of stainless iron material with a diameter of 25 mm and a thickness of 5 mm. The electrode opening of the Sphere-Plane electrode system was set to 5 mm. The electrode system was formed by mounting the electrodes with stainless steel screws to the transparent fiberglass dielectric material of 10 mm thickness, which was cut in a C-shape in principle. The image of the designed Sphere-Plane electrode system is given in Figure 2.

The established experimental set was supplied with a 500 VA source with a fixed frequency of 50 Hz and an output voltage adjustable in the range of 0-220 v. Images of the discharge current and voltage waves were obtained with the help of an analog oscilloscope.

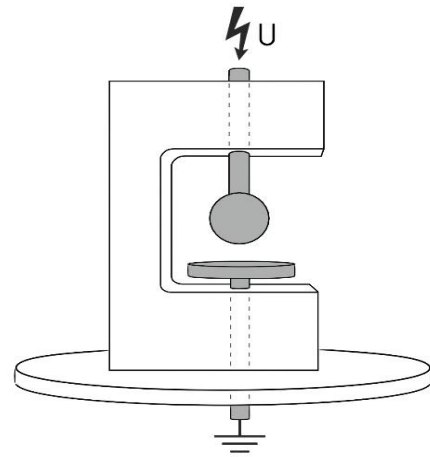


Figure 2. Sphere-Plane electrode system image

The circuit diagram of the experimental set is given in Figure 3.

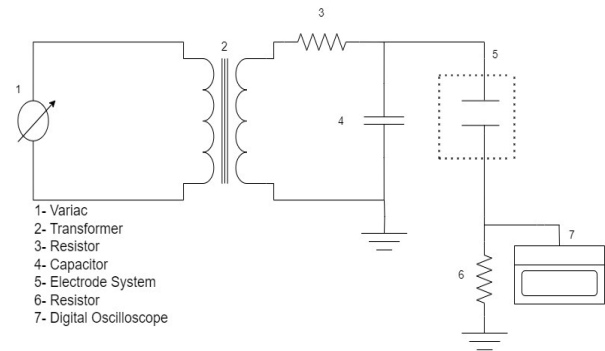


Figure 3. Circuit diagram of the experimental setup

Experiment methods

Within the scope of the experimental study, voltage and current values were measured and recorded independently of each other by applying various voltages at different frequency values to the electrode systems such as Sphere-Plane and Needle-Plane. For each selected frequency value, the application voltage was increased with certain steps and the current values corresponding to each step were recorded. Current values initially showed an increase in microampere levels in accordance with Ohm's Law. However, after a certain increase limit of the application voltage, discharge occurs and with the ignition of the discharge, the current increased with a sudden jump from Microampere levels to Ampere levels. The voltage value at this point of rise was recorded and called the ignition voltage of the discharge. It has been observed that after the ignition of the discharge, the application voltage is reduced in slow steps, and the discharge extinguishes at a certain voltage value (a value lower than the ignition voltage value). The voltage value corresponding to this point is also recorded as the damping voltage of the discharge.

Result and Discussions

Results

In order to carry out experimental analyzes of corona discharges and to obtain more realistic results, the electrode systems model, which largely correspond to the model in electrical power transmission lines, were used. Experimental studies were carried out in atmospheric conditions. During the studies, in order to minimize measurement errors, many measurements were taken in the same experiment, the average of these measurements was taken and recorded.

Needle-Plane electrode system

Corona discharges in power transmission lines normally occur at the surface of the conductor or near the surface of the conductor. Especially in alternating voltages, discharges tend towards the conductor in positive alternance, while in negative alternance they move from the conductor surface to a weak area. Trichel current oscillations occurring on positive alternans during discharge develop depending on the electrode geometry and polarization. The image of the current oscillations of the positive corona at 500 Hz frequency of the Needle-Plane electrode system photographed on the oscilloscope screen is given in Figure 4. It can be seen from the figure that the current oscillations of the positive corona are more numerous per unit area and exhibit a more stable state.

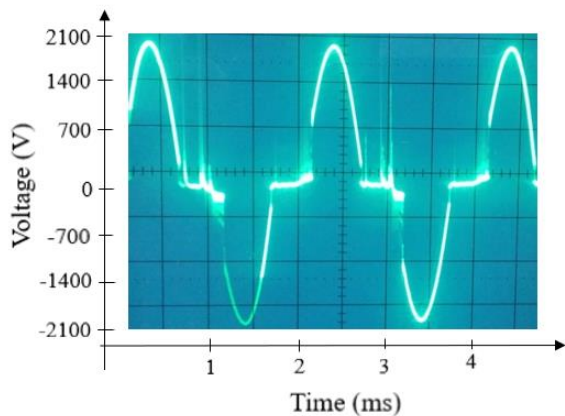


Figure 4. Image of positive corona current oscillations of the Needle-Plane electrode system at 500 Hz frequency

The photographed image of the corona discharge occurring at low frequencies (50-150 Hz) and non-homogeneous electric field in the Needle-Plane electrode system is given in Figure 5. As can be seen from the figure, the geometric structure of the discharge is spread out in a cone shape depending on the geometric structure of the electrode system.

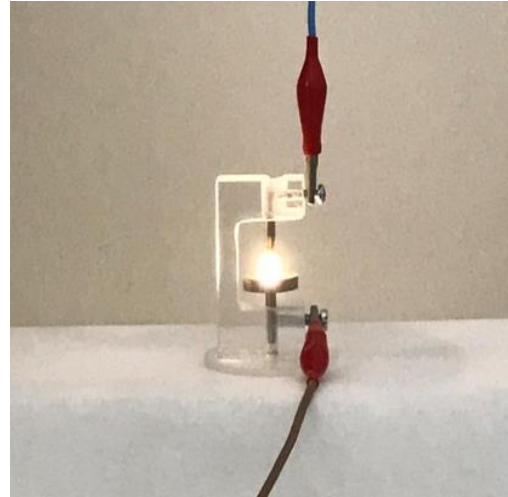


Figure 5. Corona discharge image at low frequencies in the electrode system of Needle-Plane

While one end of the discharge channels is concentrated around the needle electrode, the other ends are spread over the plane electrode surface. For this reason, it was observed that the discharge channels on the surfaces close to the plane electrode exhibit a less frequent behavior. The photographed image of the corona discharge occurring at high frequencies (350-500 Hz) and in a non-homogeneous electric field by using the Needle-Plane electrode system in cases where the frequency values are further increased is given in Figure 6. As can be seen from the figure, the geometric structure of the discharge is realized as a narrow channel depending on the geometric structure of the electrode system. While one end of the discharge channel lets is concentrated around the needle electrode, the other ends are only in the middle of the plane electrode surface and take the form of a narrow channel. For this reason, the charge density in the discharge channel is higher and a significant increase in the number of charges striking the unit surface has been observed. This situation was interpreted by utilizing the destruction effect on the electrode surface.

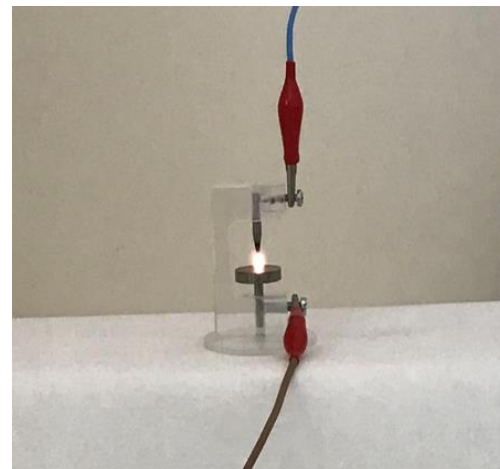


Figure 6. Corona discharge image at high frequencies in the Needle-Plane electrode system

In order to compare the experimental results obtained in the Needle-Plane electrode system, the collective

representation of the Voltage-Current graphics at the supply voltage frequencies of 50, 150, 250, 350 and 500 Hz is given in Figure 7. As can be seen from the figure as the frequency value of the supply voltage increases, the ignition voltage limit values of the corona discharge show a smooth decrease in inverse proportion to this. According to the results measured in the experimental studies, it has been observed that the current values of the discharge before ignition at 50 Hz supply voltage frequency are higher than the currents at other frequency values. The possible reason for this is that the supply source used for 50 Hz frequency value is different from the supply source used for other frequency values.

From the graph in Figure 7. in order to compare the experimental results of the corona discharges in the Needle-Plane electrode system, corona discharges' ignition and damping voltage values obtained at the supply voltage frequencies of 50, 150, 250, 350 and 500 Hz are frequency dependent; but it is seen that they exhibit an inversely proportional change. In addition, it is obvious that the discharge currents at voltage values that are smaller than the ignition voltages of the discharges formed at different frequencies also show a frequency-dependent change.

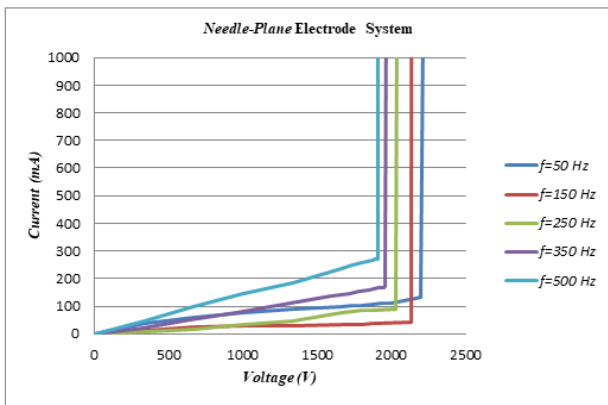


Figure 7. Graph of collective Voltage-Current changes taken at different supply voltage frequency values for the electrode system of Needle-Plane

The corona discharges' ignition and damping voltage and current values, which were experimentally measured at the different supply voltage frequencies, in the electrode system are given in Table 1. When the data in table is examined, the limit values of the ignition voltage of the discharge decrease as the frequency values of the supply voltage increase. On the other hand, the discharge damping voltage limit values have increased. This clearly indicates the frequency impact on corona discharge ignition.

Table 1. Voltage-Current discharge values for the Needle Plane electrode system's ignition and damping

	50 Hz	150 Hz	250 Hz	350 Hz	500 Hz
U_{ignition} (v)	2266,78	2140,11	2060,10	2010,10	1913,43
U_{damping} (v)	866,71	Null	873,37	1073,38	1140,05
I_{ignition} (mA)	4200,00	4000,00	3810,00	2910,00	1910,00
I_{damping} (mA)	800,00	Null	1000,00	1042,00	1131,00

Sphere-Plane electrode system

The Sphere-Plane electrode system is an additional electrode system used to determine the limit voltage values of corona discharge's ignition and damping. The image of the 50 Hz frequency current oscillations of the Sphere-Plane electrode system photographed directly from the oscilloscope screen during the experimental studies is shown in Figure 8. As can be seen from the figure, the number of current oscillations of the positive and negative corona per unit area is quite dense and stable.

The photograph of the changes in the measured current and voltage values relative to each other during the ignition of the corona discharge occurring in the Sphere-Plane electrode system, taken directly from the oscilloscope screen, is given in Figure 9. As can be seen from the figure, the variation of the discharge voltage with respect to the discharge current is in the form of a stable Lysajous diagram.

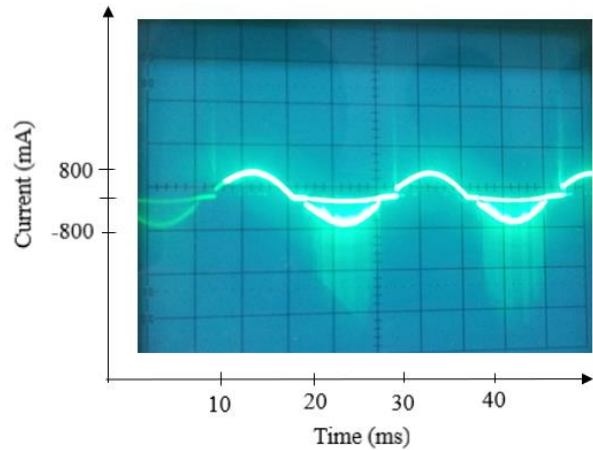


Figure 8. Image of current oscillations at 50 Hz frequency of the Sphere-Plane electrode system



Figure 9. The graph of the variation of the discharge voltage of the Sphere-Plane electrode system at 50 Hz versus the discharge current

The photographed image of the corona discharge occurring at low frequencies (50-150 Hz) and in the non-homogeneous electric field in the Sphere-Plane electrode system is given in Figure 10. Since the electric field

strength in the Sphere-Plane geometry is more homogeneous than the Needle-Plane electrode system (as seen in the figure), the geometric structure of the discharge has an ellipsoidal structure. In this case, since the discharge occurs at low frequencies, the number of discharge channels exhibited a less frequent structure.

The photograph of the corona discharge occurring at high frequencies (350-500 Hz) and in the non-homogeneous electric field in the Sphere-Plane electrode system is shown in Figure 11. In this case, since the discharge takes place at high frequencies, the number of discharge channels exhibited a denser and narrower structure.

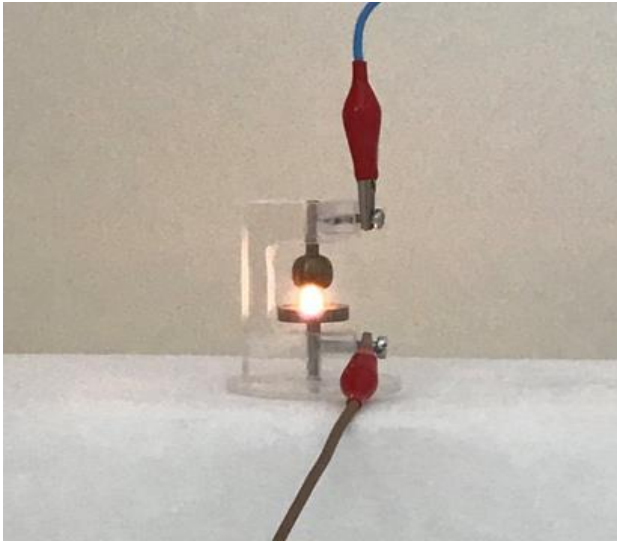


Figure 10. Corona discharge image at low frequencies in the Sphere-Plane electrode system

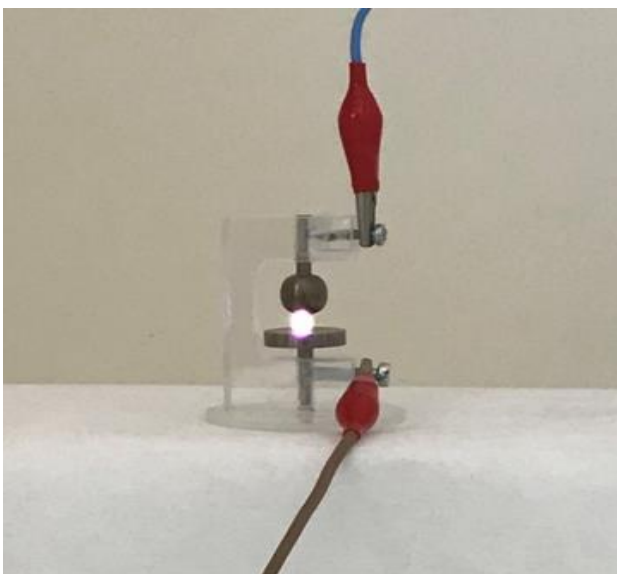


Figure 11. Corona discharge image at high frequencies in the electrode system of Sphere-Plane

In order to compare the experimental results in the Sphere-Plane electrode system, the collective representation of the Voltage-Current graphics at the supply voltage frequencies

of 50, 150, 250, 350 and 500 Hz is given in Figure 12. As can be seen from the figure, as the frequency value of the supply voltage increases, the ignition voltage limit values of the corona discharge show a smooth decrease in inverse proportion to this. According to the results measured in the experimental studies, it has been observed that the current values of the discharge before ignition at 50 Hz supply voltage frequency are higher than the currents at other frequency values. The possible reason for this is that the supply source used for 50 Hz frequency value is different from the supply source used for other frequency values.

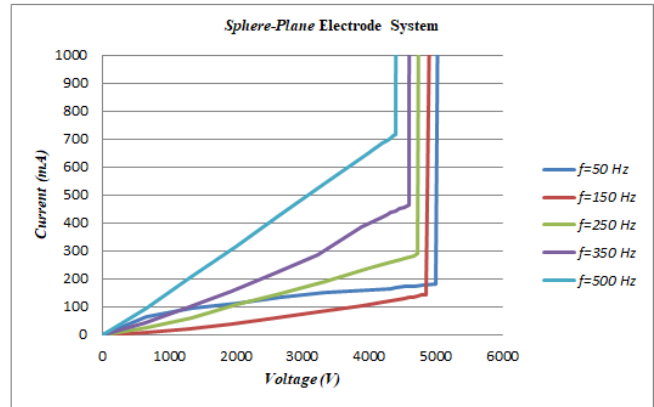


Figure 12. Voltage-Current change graph for the electrode system of Sphere-Plane, obtained at various supply voltage frequencies.

The corona discharge's ignition and damping voltage and current values of that were experimentally measured at the different supply voltage frequencies in the electrode system of Sphere-Plane are given in Table 2. When the data in table is examined, the limit values of the ignition voltage of the discharge decrease as the frequency values of the supply voltage increase. On the other hand, the discharge damping voltage limit values have increased. This clearly indicates the frequency impact on corona discharge igniting. When the current values are examined, it is seen that the ignition current values of the discharge have increased correspondingly with the decrease of the frequency. Since the electric field strength in the Sphere-Plane electrode system is more uniform than the field strength in the Needle-Plane geometry, the ignition voltage limit values of the discharge occurring in the electrodes opening are larger. Accordingly, the ignition current values of the discharge are also higher. Therefore, considering the maximum power values of the supply sources used in the system, the limit values of the discharge damping currents could not be determined.

Table 2. Voltage-Current values for the discharge's ignition and damping in the electrode system of Sphere-Plane

	50 Hz	150 Hz	250 Hz	350 Hz	500 Hz
U_{ignition} (v)	5133,59	5066,92	4800,24	4766,91	4426,89
U_{damping} (v)	1200,06	Null	Null	Null	1373,40
I_{ignition} (mA)	4440,00	4200,00	4000,00	3800,00	3600,00
I_{damping} (mA)	Null	Null	Null	Null	Null

Discussions

In order to determine the parameters of electrical discharges in gases, a supply source with high output power, output current and output voltage is needed. The geometry and surface roughness of the electrode system also have an important place in order for experimental studies to yield realistic results. In addition to these conditions, environmental parameters such as humidity, temperature, pressure, spacing between electrodes and electrical properties of the gas in the environment have important effects on the ignition and damping of electrical discharges. Therefore, it is of great importance to regulate the ambient conditions depending on the type of electrical discharges while conducting experimental studies. As a result, the correct analysis and interpretation of data received during experimental studies is important for modeling and accurately characterizing discharge.

Several experimental investigations have been conducted in Needle-Plane and Sphere-Plane electrode systems at the same electrode gap and in the same ambient circumstances to ascertain various corona discharge parameters. According to the test results measured in the Sphere-Plane electrode system, the ignition and damping voltages of the discharge's limit values were observed to be higher than the results that were obtained in the Needle-Plane geometry. This can be interpreted as an indication that the electrode geometry has a significant effect on the electric field strength, and therefore the electric field strength has a large effect on the characterization of the discharge.

Corona discharge ignition is greatly affected by the electrode's radius of curvature., which cause significant power losses in power transmission lines. The degree of homogeneity of the electric field is also of great importance in discharges that occur at fixed electrode gaps. As can be seen from the studies mentioned above and the experimental results given, the effect of the radii of curvature of the electrode tips can be clearly seen as a result of the comparison of a Needle-Plane electrode system and a Sphere-Plane electrode system. The decrease in the radius of curvature increases the degree of non-homogeneity of the electric field strength. In transmission lines, it is seen that the corona losses will increase inversely as the conductor radius decreases.

Conclusions

Current-voltage oscillations or harmonics at various frequencies occur on the lines due to circuit on-off, short-circuit faults, the effect of internal and external overvoltages caused by various reasons, and balanced or unbalanced loads that are momentarily activated and released in the energy generation, transmission and distribution lines. The impact of these high-frequency harmonics on the initiation and dampening of corona discharges in high-voltage power transmission lines has been studied experimentally. The results show that the levels of the ignition and damping voltages are strongly affected by the frequency of corona discharges that occur in high voltage transmission lines, and the limit value of the ignition voltage decreases with the increase in

frequency. Thus, it was observed that the corona losses in the lines increased with the increase in frequency. In addition, it was concluded that the radii of curvature of the electrodes have a significant effect on the formation of the corona discharge, and the increase in the radius of curvature has an effect in the direction of complicating the ignition of the corona discharge. As a result, in order to eliminate high-frequency harmonics that have the effect of facilitating corona losses in electrical energy transmission lines, filtering processes should be done very well or Soft-Start systems should be preferred as much as possible instead of On/Off type switching in network systems.

Reference

- [1] B.B. Alagoz, H.Z. Alisoy, S. Alagoz, F. Hansu, "A space charge motion simulation with FDTD method and application in negative corona electrostatic field analysis", *Applied Mathematics and Computation*, 218, pp. 9007-9017,2012
- [2] G. ALISOY, F. Hansu, B.B. ALAGOZ, H.Z. ALİSOY, "Transient analysis of double layer metal-gas-dielectric-metal DBD cell", *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 5, pp. 14-21,2017
- [3] Y. Cheng, C. Li, X. Huang, "Study of corona discharge pattern on high voltage transmission lines for inspecting faulty porcelain insulators", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23, pp. 945-952, 2008
- [4] A. Carsimamovic, A. Mujezinovic, S. Carsimamovic, Z. Bajramovic, M. Kosarac, K. Stankovic, "Analyzing of AC Corona discharge parameters of atmospheric air", *Procedia Computer Science*, 83, pp. 766-773, 2016
- [5] G. T. Lewis, G. G. Karady, M. D. Sirkis, "An analysis of the frequency characteristics of corona discharge at low pressure", *Philips Laboratory Directorate Of Advanced Weapons And Survivability Air Force Systems Command Kirtland Air Force Base, NM 87117-6008*, 1991
- [6] E. S. Jonson, P. D. Pedrow, B. L. Qin, " Influence of voltage and load current on dc bipolar corona pulses", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Volume:1, Issue: 2, pp. 284 – 293, Apr 1994
- [7] M. Abdel-Salama, A. Muftib, "Analysis of corona losses on monopolar dc transmission lines", *Electric Power Systems Research*, Volume 44, Issue 2, pp. 145-154, February 1998
- [8] P. Fuangpian, T. Zafar, S. Ruankorn, T. Suwanasri, " Experimental investigation of the corona discharge in electrical transmission due to ac/dc electric fields ", *MATEC Web of Conferences* 50, 01004, pp. 1-5, 2016
- [9] M. Rezinkina, O. Rezinkin, F. D'Alessandro, A. Danyliuk, A. Guchenko, S. Lytvynenko, "Experimental and modelling study of the dependence of corona discharge on electrode geometry and ambient electric field", *Journal of Electrostatics*, Volume 87, pp. 79-85, June 2017
- [10] R. Çetin, " Atmosferik nemin yüksek gerilim hava hatlarında gerçekleşen korona kayiplari üzerindeki etkisinin deneysel olarak incelenmesi", *Siirt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, (520865), 2018

- [11] P. Dordizadeh, K. Adamiak, G.P. Castle, "Experimental study of the characteristics of Trichel pulses in the needle-plane negative corona discharge in atmospheric air", *Journal of Electrostatics*, 88, pp. 49-54, 2017
- [12] H. Alisoy, C. Yeroglu, M. Koseoglu, F. Hansu, "Investigation of the characteristics of dielectric barrier discharge in transition region", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 38, pp. 4272, 2005
- [13] H.Z. Alisoy, A. Yesil, M. Koseoglu, I. Unal, "An approach for unipolar corona discharge in N₂/O₂ gas mixture by considering townsend conditions", *Journal of Electrostatics*, 69, pp. 284-290, 2011
- [14] P. Fuangpian, T. Zafar, S. Ruankorn, T. Suwanasri, "Experimental investigation of the corona discharge in electrical transmission due to AC/DC electric fields", in: *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, pp. 01004, 2016
- [15] T.G. Lewis, G.G. Karady, M.D. Sirkis, "An Analysis of the Frequency Characteristics of Corona Discharge at Low Pressure", in, *PHILLIPS LAB KIRTLAND AFB NM*, 1991
- [16] A. Jaworek, A. Krupa, "Corona discharge from a multipoint electrode in flowing air", *Journal of electrostatics*, 38, pp.187-197,1996
- [17] P. Intra, A. Yawootti, P. Rattanadecho, "Influence of the corona-wire diameter and length on corona discharge characteristics of a cylindrical tri-axial charger", *Journal of Electrostatics*, 74, pp. 37-46, 2015
- [18] W. He, Y. Wang, L. Lan, X. Wen, B. Wan, "Characteristics of AC corona discharge pulses and RI levels in a coaxial wire-cylinder gap", 2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), IEEE, pp. 1-4, 2016
- [19] E.A. Yahaya, T. Jacob, M. Nwohu, A. Sadiq, "Power loss due to corona on High Voltage Transmission lines", 2013
- [20] H.A. Said, H. Nouri, Y. Zebboudj, "Analysis of current-voltage characteristics in the wires-to-planes geometry during corona discharge", *The European Physical Journal-Applied Physics*, 67, 2014
- [21] M. Rezinkina, O. Rezinkin, F. D'Alessandro, A. Danyliuk, A. Guchenko, S. Lytvynenko, "Experimental and modelling study of the dependence of corona discharge on electrode geometry and ambient electric field", *Journal of Electrostatics*, 87, pp. 79-85, 2017



PEM yakıt pillerinde PSO tabanlı PI ve FOPI kontrollü DC/DC dönüştürücülerine ilişkin performansların karşılaştırılması

Comparison of performances of PSO-based PI and FOPI controlled DC/DC converters in PEM fuel cells

Büşra Nur Uçmaz¹, Yurdağül Benteşen Yakut^{2*}

¹ Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, ucmazbusranur@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9457-6745>

² Dicle Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, bentesen@dicle.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3236-213X>

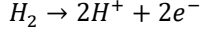
MAKALE BİLGİLERİ	ÖZ
<p><i>Makale Geçmişi:</i></p> <p>Geliş 10 Ekim 2023 Revizyon 25 Ekim 2023 Kabul 26 Kasım 2023 Online 29 Mart 2024</p> <p><i>Anahtar Kelimeler:</i></p> <p>PEMFC, Performans, PSO, PI kontrolör, FOPI</p>	<p>Bu çalışmada, Simulink PEMFC modelinin performansını iyileştirmek amacıyla geleneksel PI, PSO tabanlı PI ve PSO tabanlı FOPI olmak üzere üç farklı uygulama ile yükseltici DC/DC (boost) kontrolör geliştirilmiş ve yöntemlerin arasındaki başarımlar oranları karşılaştırılmıştır. Yöntemlere ilişkin performansların karşılaştırılmasında; en büyük aşım, yükselme süresi ve yerleşme süresi ölçüt olarak alınmıştır. Geleneksel PI modelinde, ampirik yaklaşımla PI değerleri $K_p=0.001$ ve $K_i=0.15$ olarak elde edilmiştir. PSO tabanlı PI modelinde ise katsayılar ($K_p=0.2042$, $K_i=1$) olarak belirlenmiştir. PSO için farklı parçacık sayıları ile model denenmiş ve en iyi sonucun 20 parçacıkla elde edildiği tespit edilmiştir. Son olarak PSO tabanlı FOPI uygulamasında ise PI^{λ} kontrolör katsayıları ($K_p=0.7753$, $K_i=0.3650$ ve $\lambda=0.2050$) olarak belirlenmiştir. Bulgulara göre, önerilen PSO tabanlı PI ve PSO tabanlı FOPI yaklaşımları ile elde edilen performans, geleneksel PI yaklaşımı ile elde edilen performanstan daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, tüm (P, V, I) parametrelerde görülmüştür.</p>

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p><i>Article history:</i></p> <p>Received 10 October 2023 Received in revised form 25 October 2023 Accepted 26 November 2023 Available online 29 March 2024</p> <p><i>Keywords:</i></p> <p>Performance, PEMFC, PSO, PI controller, FOPI</p>	<p>In this study, in order to improve the performance of the Simulink PEMFC model, DC/DC (boost) controller was developed with three different applications: conventional PI, PSO-based PI and PSO-based FOPI, and the performance rates between the methods were compared. In comparing the performances of the methods; The largest overshoot, rise time and settling time were taken as criteria. In the conventional PI model, PI values were obtained as $K_p = 0.001$ and $K_i = 0.15$ with the empirical approach. In the PSO-based PI model, the coefficients are determined as ($K_p = 0.2042$, $K_i = 1$). For PSO, the model was tested with different particle numbers and it was determined that the best result was obtained with 20 particles. Finally, in the PSO-based FOPI application, PI^{λ} controller coefficients were determined as ($K_p = 0.7753$, $K_i = 0.3650$ and $\lambda = 0.2050$). According to the findings, it has been observed that the performance obtained with the proposed PSO-based PI and PSO-based FOPI approaches is better than the performance obtained with the conventional PI approach. This situation was seen in all (P, V, I) parameters.</p>

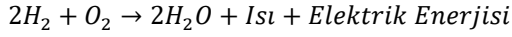
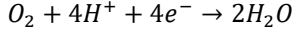
Doi: 10.24012/dumf.1373835

* Sorumlu Yazar

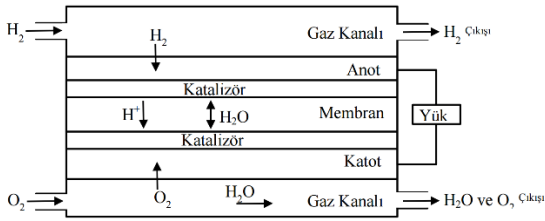
(örn. Platin içerikli bileşikler) etkisiyle protonlara ve elektronlara ayırır. PEM yakıt hücresindeki anot reaksiyonu:



Ayrılan protonlar, membran diye adlandırılan proton ileten elektrolitten geçerken, elektronların hareketi ile oluşan elektrik akımı sistem dışında yer alan elektrik devresinden geçirilir. Elektrolit arasından geçen protonlar, elektrik devresinden geçen elektronlar ile tekrar bağlanır ve oksijenle birleşerek saf su buharı ile birlikte ısı meydana getirirler [7]. PEM yakıt hücresindeki katot reaksiyonu ve toplam reaksiyonlar sırasıyla:

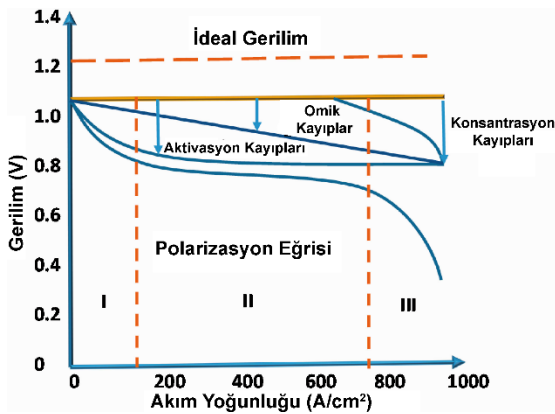


60 ile 80 °C arasındaki düşük çalışma sıcaklığında çalışabilmesi, elektrik üretim işlemine hızlı başlaması, güç talebindeki değişikliklere hızlı yanıt vermesi, donanımsal olarak hafif ve düşük hacimde olması ile birlikte yüksek güç yoğunluğuna sahip olması, günümüzde olduğu gibi gelecekte de birçok alanda uygulanabileceği anlaşılmaktadır. [7].



Şekil 2. Yakıt pili yapısı ve çalışma sistemi [8]

PEM yakıt pilinin kayıp eğrisi, genellikle bir yakıt pilinin karakteristiğini ifade etmekte olup, polarizasyon eğrisi olarak adlandırılır (Şekil 3). Şekilden görüldüğü üzere hücrenin V/I değişimi doğrusal olmayan bir karakteristiğe sahiptir. Doğrusal olmayışı ise akım yoğunluğu, hücre sıcaklığı, membran nemliliği ve reaktant kısmi basıncı gibi faktörlere bağlıdır [9].



Şekil 3. PEM yakıt pilinin polarizasyon eğrisi [10]

PI Kontrollü DC/DC Yükseltici (Boost) Dönüştürücü

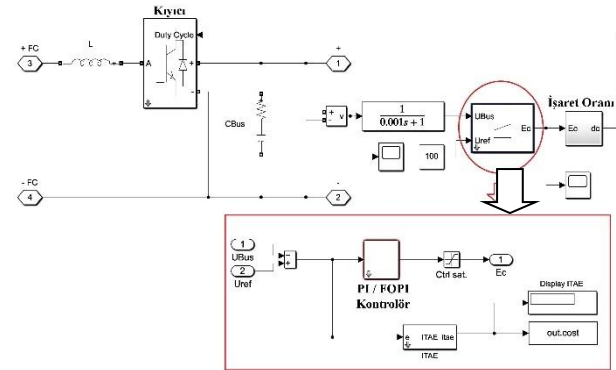
Günümüzde endüstride ihtiyaç olan elektrik enerjisini sağlayan güç kaynaklarının kararlı olması, zorunlu hale gelmiştir. Oluşan bu ihtiyacın karşılanması anahtarlamalı güç kaynakları ile mümkündür [11]. Yumuşak hız kontrolü, yüksek verim ve dinamik tepki gibi avantajları nedeniyle DC-DC dönüştürücüler tercih edilmektedir. PEMFC çıkışı gerilimi kullanılan yerlerine göre araçlarda, konut uygulamalarında güç aktarma birimleriyle yükseltilebilmektedirler [12].

Gerilimi regüle etmekle birlikte genliği düşürme (Buck) veya yükseltme (Boost) amacıyla kullanılan DC-DC dönüştürücülerde çıkış voltajının büyüklüğü, dönüştürücü anahtarının girişindeki darbenin görev oranının (Duty cycles) kontrol edilmesi ve dönüştürücü anahtarının her döngüde açılıp kapatılmasıyla kontrol edilir.

Bu çalışmada kullanılan yükseltici (Boost) DC/DC dönüştürücüler, giriş DC gerilimini daha yüksek seviyede çıkış DC gerilimine dönüştüren çeviricilerdir. Simulink PEMFC modelinin çıkışında kullanılan 100V DC/DC (ortalama değer) dönüştürücü paketinde, IGBT anahtarlama elemanı kullanılır.

DC-DC dönüştürücülerin yük değeri ya da giriş gerilimi değişse de çıkış değerlerinin sabit kalması gerekmektedir [12]. PID kontrol yöntemleri bu aşamada sıklıkla tercih edilen bir yaklaşımdır [14]. Çalışmalarda, kontrolör katsayıları ayarlanarak PID kontrolörden en iyi performansın elde edilmesi üzerine odaklanılır. Katsayıların belirlenmesi ile ilişkili literatürde bilinen en temel yöntemler ise Ziegler-Nichols, Cohen-Coon kuralları, Åström-Hägglund yöntemi ve ileri Ziegler-Nichols yöntemidir [15].

Bu çalışmada PEMFC çıkışında PI kontrollü DC-DC dönüştürücü kullanılmış olup, PI katsayıları PSO ve PSO-FOPI yöntemleri ile belirlenmiştir. Çalışmadaki dönüştürücüye ilişkin Matlab-Simulink modeli şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. PSO tabanlı PI/FOPI kontrollü DC/DC dönüştürücü simulink modeli

Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)

1990'ların ortalarında kuş veya balık sürülerinin yiyecek arama davranışlarının algoritmaya dönüştürülmesiyle bulunan bir yöntem olup, Kennedy ve Eberhart tarafından geliştirilmiştir [16]. PSO yönteminin en önemli avantajı

karmaşık sistemlerin çözümü için basit bir yöntem olmasıdır.

PSO yönteminde, sürünün her bireyi çözüm uzayında dolaştığı ve optimizasyon probleminde her parçacığın bir çözüm adayı olduğu kabul edilir. Parçacığın pozisyonu (konumu) iki parametreye dayanır. Bu parametreler; kendisinin lokalde daha önce ziyaret ettiği en iyi (p_{best}) konum ve sürüde ziyaret edilen en iyi (g_{best}) konum parametresidir. Her bir parçacığın performansı belirlenen maliyet (fitness) fonksiyonu ile hesaplanır.

Bir parçacığın konum (s_i^k) ve hız (v_i^k) denklemleri sırasıyla (1) ve (2) nolu denklemlerde belirtildiği şekilde hesaplanır [17].

$$v_i^{k+1} = w \cdot v_i^k + c_1 rand_1 \cdot (p_{best_i} - s_i^k) \quad (1)$$

$$+ c_2 rand_2 \cdot (g_{best} - s_i^k)$$

$$s_i^{k+1} = s_i^k + v_i^{k+1} \quad (2)$$

Denklemlerde yer alan $rand_1$ ve $rand_2$ [0, 1] aralığında seçilmiş rastgele sayılar olup, w terimi atalet ağırlığını ifade etmektedir. c_1 ve c_2 ise ivmelenme sabitleridir. Ayrıca denklemlerde yer alan s_i^{k+1} ve v_i^k terimleri sırasıyla geçerli konumu ve yeni parçacık konumunu ifade eder.

Parçacığın hesaplanan hız değeri, kontrol edilemeyen osilasyonlara girmemesi amacıyla belirli sınırlar arasında tutulması sağlanır. Bu aşamada denklem (3) kullanılır.

$$v^{max} = (x^{max} - x^{min})(10\% \sim 20\%) \quad (3)$$

$$v^{min} = -v^{max}$$

Bu çalışmada hem klasik PI ve hem de kesir dereceli PI parametre değerleri, PSO yöntemi ile belirlenmiştir.

PSO-FOPI

Pudlobny tarafından ilk kez uygulanan kesir dereceli PID ($PI^\lambda D^\mu$) kontrolörün [18], son yıllarda lineer olmayan sistemlerin denetiminde yüksek performans sergilediği görülebilmektedir [19,20]. $PI^\lambda D^\mu$ kontrolörün, kontrol sistemleri için daha iyi performans ve kararlılık sağladığı [20] nolu referansta belirtilmiştir. Klasik PID yönteminin $PI^\lambda D^\mu$ tipi kesir dereceli yöntemle göre farkı; kesir dereceli kontrolörde, türev ve integral derecesi herhangi bir reel sayı olabilir [18]. $PI^\lambda D^\mu$ kontrolör yaygın olarak denklem (4) de gösterildiği şekilde ifade edilir.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i D^{-\lambda} e(t) + K_d D^\mu e(t) \quad (4)$$

İfadenin Laplace dönüşümü ile elde edilecek transfer fonksiyonu denklem (5)'de verilmiştir.

$$G(s) = K_p + K_i s^{-\lambda} + K_d s^\mu \quad (5)$$

Burada $\lambda, \mu \in R$ ve $\lambda, \mu \geq 0$ olup, sırasıyla türev ve integral terimlerinin kesir derecesini ifade eder. Kontrolörün katsayıları olan K_p, K_i ve K_d terimleri sırasıyla oransal, integral ve türev kazancını ifade eder.

$PI^\lambda D^\mu$ kontrolör tasarlamak için gerekli parametre sayısı 5 (K_p, K_i, K_d, λ ve μ) olup, parametrelerin belirlenmesi konusunda literatürde farklı yöntemler önerilmektedir. Bu yöntemlerden biride parçacık sürü optimizasyonuna (PSO) yöntemine dayalı hesaplama yöntemidir. Klasik PSO

yönteminde, c_1 değeri parçacığı en iyi pozisyona çekerken c_2 değeri sürüyü küresel en iyi konuma çeker. Dolayısıyla PSO-FOPI yönteminde, c_1 ve c_2 değerleri 4 farklı durum (keşif, yararlı, yakınsama ve dışlama durumları) için farklı değerler alır. Söz konusu durumlar kapsamında, c_1 ve c_2 için izlenen yaklaşımlar Tablo 1'de listelenmiştir.

Tablo 1. PSO-FOPI'de farklı durumlarda c 'ler için izlenen yaklaşım [22]

Durum	İzlenen strateji
Keşif durumu	c_1 artırılır, c_2 azaltılır
Yararlı durumu	c_1 biraz artırılır, c_2 biraz azaltılır
Yakınsama durumu	c_1 ve c_2 biraz artırılır
Dışlama durumu	c_1 azaltılır, c_2 artırılır

Bu çalışmada PI^λ kontrolörün parametreleri PSO-FOPI yöntemi ile optimize edilmiştir.

Performans Endeksi (Maliyet)

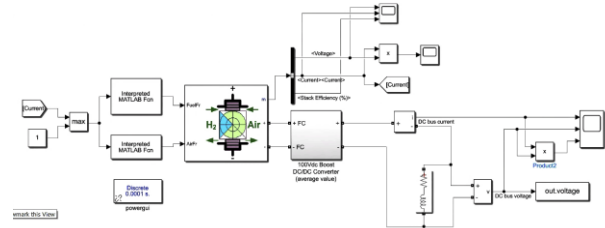
Bu çalışmada optimum değerlerin tespiti için PSO yöntemi kullanılmış ve optimum çözüm için performans endeksi kullanılmıştır. İntegral Zaman Mutlak Hata (Integral Time Absolute Error - ITAE) fonksiyonu, performans endeksi olarak kullanılmış olup, denklem (6) da belirtildiği şekilde tanımlanır.

$$ITEA = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \quad (6)$$

Her iterasyonda oluşan hatanın genliği ITEA ile belirlenmiş ve optimum parametreler için minimum ITEA hata değeri aranmıştır. Hata değeri çalışmada maliyet olarak değerlendirilmiştir.

Çalışmada Önerilen Model

PEMFC'nin performans iyileştirmesi geleneksel PI, PSO tabanlı PI ve PSO-FOPI kontrolörleri ile gerçekleştirilerek bu makalede sunulmuştur. Çalışmada kullanılan Matlab simulink paketi Şekil 5'te gösterilmiştir. Şekilde gösterildiği üzere PEMFC çıkışına DC/DC dönüştürücü bağlanmıştır. DC/DC dönüştürücünün kapsamı şekil 4'te gösterilmiştir.



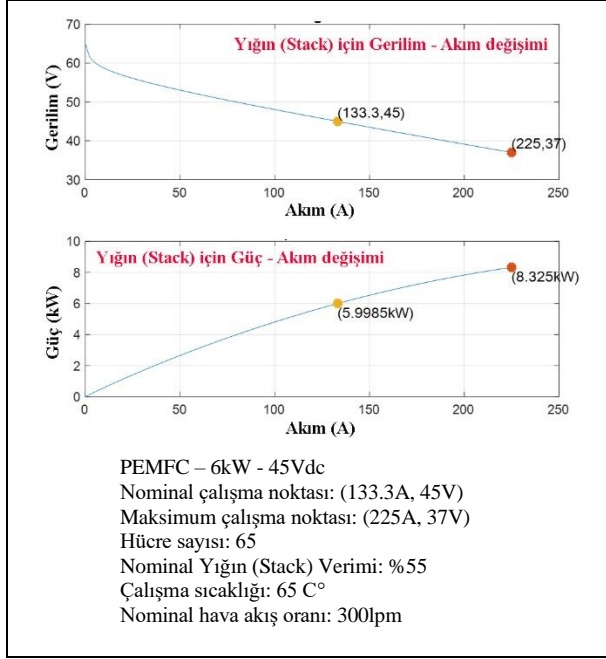
Şekil 5. Çalışmada kullanılan simulink paketi

Şekil 4'te gösterilen PEMFC modeline ilişkin parametre değerleri ve V/I karakteristiği şekil 6'da gösterilmiştir.

Şekil 4'de görüldüğü üzere, Hidrojen tüketimi [L/dak] ve oksijen hava akışı [m³/s] giriş olarak alınmıştır. Yakıt pilinin çıkışında elde edilen DC gerilim değeri DC/DC dönüştürücü girişine uygulanmıştır. DC/DC dönüştürücü için belirlenen simulink modeli şekil 4'de gösterilmiştir.

Bir yakıt hücresinde %70 ile %80 aralığında bir yük ile yüklendiğinde maksimum verimlilik elde edilir. [23]. Bu

çalışmada, 6 kW'lık yakıt pili kullanılmış ve sistem yükü %75 yüklenme oranı ile 4.5 kW seçilmiştir. Çalışmada sabit bir RL yükü kullanılmış olup, empedans değerleri $Z_R=4.5k\Omega$ ve $Z_L=4500\Omega$ olarak belirlenmiştir.



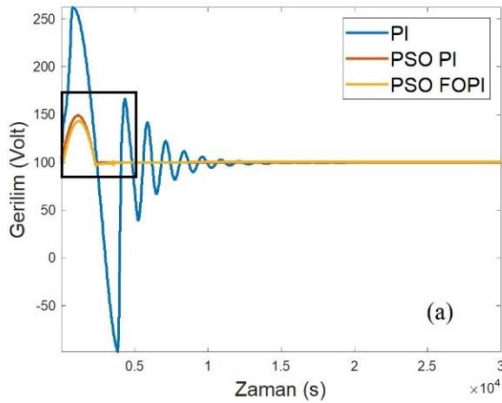
Şekil 6. Çalışmada kullanılan Simulink PEMFC model parametreleri ve V/I karakteristiği

Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, Simulink PEMFC modelinin performansını iyileştirmek amacıyla geleneksel PI, PSO tabanlı PI ve PSO tabanlı FOPI olmak üzere 3 farklı uygulama geliştirilmiş ve yöntemlerin arasındaki başarımları karşılaştırılmıştır. Bu bölümde yapılan uygulamaların bulguları verilmiştir.

Geleneksel PI Modeli: Birinci uygulamada geleneksel uygulama olan ampirik yaklaşımla PI değerleri $K_p=0.001$ ve $K_i=0.15$ olacak şekilde elde edilmiştir.

PSO tabanlı PI Modeli: İkinci uygulamada, (K_p , K_i) olan PI katsayıları PSO yöntemi ile belirlenmiştir. PSO için farklı parçacık sayıları ile model denenmiş ve en iyi sonucun 20 parçacıkla elde edildiği tespit edilmiştir.



İterasyon sayısı 100 alınmış ve her iki parametre için denemeler neticesinde (0, 1) değer aralığında çözüm aranmıştır. Diğer parametre değerleri; $w=0.9$, $c_1=1.2$ ve $c_2=1.2$ olarak alınmıştır.

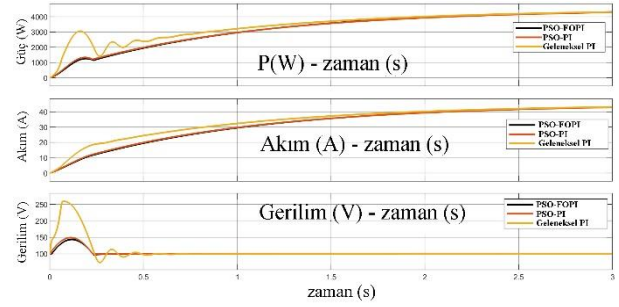
PSO tabanlı FOPI Modeli: Üçüncü uygulamada ise DC/DC dönüştürücü, kesir dereceli PI^λ kontrolörü ile denetlenmiş ve kontrolörün parametreleri PSO ile belirlenmiştir. Bir önceki PSO uygulamasında kullanılan parametre değerleri burada da tekrar edilmiştir. Sadece bu uygulamada 2 değil, (K_p , K_i ve λ) olmak üzere 3 parametre değeri belirlenmiştir.

Her üç modelin çalıştırılması ile elde edilen optimum PI katsayıları ve ilişkili maliyet değerleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

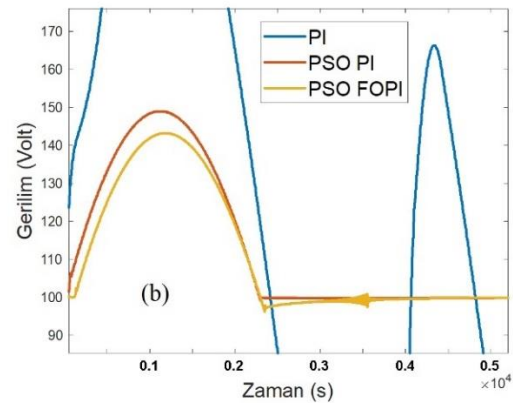
Tablo 2. PI katsayıları ve ilişkili maliyet değerleri

	K_p	K_i	λ	Maliyet
PI	0.001	0.15	---	---
PSO-PI	0.2042	1	---	89.6159
PSO-FOPI	0.7753	0.3650	0.2050	0.8099

PEMFC'nin performans iyileştirmesi geleneksel PI, PSO tabanlı PI (PSO-PI) ve PSO-FOPI kontrolörleri ile gerçekleştirilmiş ve elde edilen optimum katsayılar ile sistem çıkışında gözlemlenen değişimler Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekil 6'da sırasıyla güç, akım ve gerilim değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 7. Geleneksel PI, PSO tabanlı PI ve PSO-FOPI kontrolörleri ile sistem çıkışında görülen güç, akım ve gerilim değişimleri.



Şekil 8. (a) Geleneksel PI, PSO-PI ve PSO-FOPI kontrolörleri ile elde edilen çıkış gerilim değişimleri
 (b) Başlangıç aşamasında görülen gerilim değişimleri

Şekil 7’de yer alan gerilim değişiminin detayı, şekil 8(a) ve (b)’de gösterilmiştir.

Bulgular incelendiğinde elde edilen çıkarımlar aşağıda listelenmiştir.

- Önerilen PSO-PI ve PSO-FOPI yaklaşımları ile elde performans, geleneksel PI yaklaşımı ile elde edilen performanstan daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, tüm (P, V, I) parametrelerde görülebilmektedir.
- Yöntemlere ilişkin performansların karşılaştırılmasında; en büyük aşım, yükselme süresi ve yerleşme süresi ölçüt olarak alınmıştır. Söz konusu ölçütlere göre tespitin çıkış gerilimi (Şekil 7) üzerinden yapılabileceği görülmektedir. Tüm ölçütlerde, PSO-PI ve PSO-FOPI yaklaşımlarının geleneksel PI modeline göre daha yüksek performans gösterdiği gözlemlenmiştir.
- En büyük aşım ölçütü dikkate alındığında, PSO-FOPI yaklaşımının PSO-PI yaklaşımına göre biraz daha iyi bir performans sergilediği gözlemlenmiştir.

Sonuçlar

Bu çalışmada, Simulink PEMFC modelinin performansını iyileştirmek amacıyla geleneksel PI, PSO tabanlı PI ve PSO tabanlı FOPI olmak üzere 3 farklı uygulama ile yükseltici DC/DC (boost) kontrolör geliştirilmiş ve yöntemlerin arasındaki başarımları karşılaştırılmıştır. Yöntemlere ilişkin performansların karşılaştırılmasında; en büyük aşım, yükselme süresi ve yerleşme süresi ölçüt olarak alınmıştır. Geleneksel PI modelinde, ampirik yaklaşımla PI değerleri $K_p=0.001$ ve $K_i=0.15$ olarak elde edilmiştir. PSO tabanlı PI modelinde ise katsayılar ($K_p=0.2042$, $K_i=1$) olarak belirlenmiştir. PSO için farklı parçacık sayıları ile model denenmiş ve en iyi sonucun 20 parçacıkla elde edildiği tespit edilmiştir. Son olarak PSO tabanlı FOPI uygulamasında ise PI^{λ} kontrolör katsayıları ($K_p=0.7753$, $K_i=0.3650$ ve $\lambda=0.2050$) olarak belirlenmiştir. Bulgulara göre, önerilen PSO tabanlı PI ve PSO tabanlı FOPI yaklaşımları ile elde edilen performans, geleneksel PI yaklaşımı ile elde edilen performanstan daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, tüm (P, V, I) parametrelerde görülmüştür.

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

Yazar makaleyi tasarladı, literatür taraması yaptı, deneysel çalışmalar ve analizler yaptı, sonuçları tartıştı ve makaleyi yazdı.

Kaynaklar

- [1] F. Laurencelle, R. Chahine, J. Hamelin, K. Agbossou, M. Fournier, T.K. Bose, “Characterization of a Ballard MK5-E proton exchange membrane fuel cell stack”. *Fuel Cells J* pp. 66-71,2001, DOI: 10.58559/ijes.1264797
- [2] S. Singh, V. K.1 Tayal, H.P Singh, V.K. Yadav, “Dynamic Performance Enhancement of PEM Fuel Cell Using PSO Optimized Fractional Order PI Controller”, *Suranaree J. Sci. Technol.* pp. 1-9 Vol. 29 No. 6; November - December 2022
- [3] Yi Zhou, "A Summary of PID Control Algorithms Based on AI-Enabled Embedded Systems", *Security and Communication Networks*, vol. 2022, Article ID 7156713, 7 pages, 2022.
- [4] Z. Qi, J. Tang, J. Pei, L. Shan, “Fractional controller design of a DC-DC converter for PEMFC”. *IEEE Access*. 2020,8:120,134-120,144 DOI:10.1109
- [5] M. Mehrabi, S. Rezazadeh, M. Sharifpur, J. Meyer, “Modeling of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) performance by using genetic algorithm polynomial neural network (Ga-Pnn) hybrid system”. *In: Proceedings of the ASME 2012 10th Fuel Cell Science, Engineering and Technology Conference Fuel Cell.*, p. 447-452.
- [6] O.I. Khalaf, G.M. Abdulsahib, B.M. Sabbar, “Optimization of wireless sensor network coverage using the bee algorithm”. *J. Inform. Sci. Eng.*, 2020, 36:377-386.
- [7] Kraytsberg, A., Ein-Eli, Y. “Review of Advanced Materials for Proton Exchange Membrane Fuel Cells,” *Energy and Fuels*, 2014, 28(12), 7303–30.
- [8] Ural, Z., “Yakıt Pilleri ve Bir PEM Yakıt Pili Sisteminin Dinamik Benzetimi”, Y. Lisans Tezi, Dicle Üniv., Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran, 2007.
- [9] J.H. Hirschenhofer, “Fuel Cell Status: 1996”, *IEEEAES Systems Magazine*, March 1997, pp. 23-28
- [10] IH. Gilani, M. Amjad, SS. Khan, “PEMFC application through coal gasification along with cost-benefit analysis: A case study for South Africa”. *Energy Exploration & Exploitation*. 2021, 39(5):1551-1587. DOI:10.1177/014459872199972
- [11] DW. Hart, “*Power Electronics*”, 1sd ed. New York, USA: McGraw-Hill, 2010, pp.196-264.
- [12] A. Bilhan, Yakıt Pili Uygulamaları için Kademeli Yükseltici DA/DA Dönüştürücü Devresinin Tasarımı, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, c. 11, sayı. 1, ss. 29-37, Mar. 2020, doi:10.24012/dumf.527601
- [13] H. Guldemir, “Study of Sliding Mode Control of DC-DC Buck Converter”, *Energy Power Eng.*, vol 3, issue 4, pp. 401-406, 2011.
- [14] M. Hong-bo, F. Quan-yuan, “Optimized PID Controller Design for Buck DC-DC Switching Converters”, *Sch. Inf. Sci. Technol. Jiaotong Univ.*, 2008, vol 12, issue 6, pp. 640-643.
- [15] M. Zhuang, DP.Atherton, “Automatic tuning of optimum PID”, *IEE Proceedings D – Control Theory and Applications*, 1993, 140(3), 216-224.

- [16] J. Kennedy, R.C. Eberhart, "Particle swarm optimization", *IEEE IJCNN*, 4, 1995, 1942–1948.
- [17] Y. Shi, R.C. Eberhart, "A modified particle swarm optimizer", *Proceeding of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, 1998, 69-73.
- [18] I. Podlubny, "Fractional-Order Systems and – Controllers," *IEEE Trans. on Automatic Control*, 1999, Cilt:44, No:1.
- [19] F. Padula, A. Visioli, "Tuning rules for optimal PID and fractional-order PID controllers," *Journal of Process Control*, 2011, Cilt: 21, No:1, s:69-81.
- [20] Y. Luo, Y.Q. Chen, C.Y. Wang, Y.G. Pi, "Tuning fractional order proportional integral controllers for fractional order systems," *Journal of Process Control*, 2010, Cilt:20 No: 7, s:823–831,
- [21] I. Petras, "Control Quality Enhancement by Fractional Order Controllers", *Acta Montanistica Slovaca*, 1998, Vol. 3, No 2, 143-148.
- [22] A. Özkan, T. Mustafa, T. Remzi, "Kesir Dereceli Denetleyici Parametrelerinin Bulanık Adaptif Parçacık Sürü Optimizasyon Yöntemi ile Belirlenmesi", Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi (TOK) 2012 Ulusal Toplantısı , Niğde, Turkey, pp.445-450, 2012
- [23] S. Celik, M. Alkan, "Katı oksit yakıt pilinde yakıt kullanım veriminin deneysel olarak incelenmesi", in Omer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences, 2018, pp.966-978



A Multi-Metric Model for analyzing and comparing extractive text summarization approaches and algorithms on scientific papers

Mehmet Ali DURSUN^{1*}, Soydan SERTTAŞ²

¹ Kutahya Dumlupinar University, ;Computer Engineering Department, mehmet.dursun@dpu.edu.tr, Orcid No: 0000-0001-6370-1160

² Kutahya Dumlupinar University, ;Computer Engineering Department, soydan.serttas@dpu.edu.tr, Orcid No: 0000-0001-8887-8675

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16 October 2023
Received in revised form 17
February 2024
Accepted 18 February 2024
Available online 29 March 2024

Keywords:

Text summarization, Summarization
algorithms, Evaluation metrics,
Keyword extraction, Extractive text
summarization

Doi: 10.24012/dumf.1376978

* Corresponding author

ABSTRACT

In today's world, where data and information are increasingly proliferating, text summarization and technologies play a critical role in making large amounts of text data more accessible and meaningful. In business, the news industry, academic research, and many other fields, text summarization helps make quick decisions, access information faster, and manage resources more effectively. Additionally, text summarization research is conducted to further improve these technologies and develop new methods and algorithms to provide better summarization of texts. Therefore, text summarization and research in this field are of great importance in the information age. In this study, a new operating model for text summarization that can be applied to different algorithms is proposed and evaluated. Sixteen summarization algorithms covering six approaches (statistical, graph-based, content-based, pointer-based, position-based, and user-oriented) were implemented and tested on 50 different full-text article datasets. Four evaluation criteria (BLEU, Rouge-N, Rouge-L, METEOR) were used to assess the similarity between the generated summaries and the original summaries. The performance of the algorithms within each approach was averaged and the overall best-performing algorithm was selected. This best algorithm was subjected to further analysis through Topic Modelling and Keyword Extraction to identify key topics and keywords within the summarised text. The proposed model provides a standardized workflow for developing and thoroughly testing summarization algorithms across datasets and evaluation metrics to determine the most appropriate summarization approach. This study demonstrates the effectiveness of the model on a variety of algorithm types and text sources.

Introduction

Automatic text summarization has become an indispensable tool for distilling key information from large volumes of text data [1]. As the amount of textual information grows exponentially in the digital age, summarization techniques help users rapidly filter and extract salient content [2]. This paper provides a comprehensive survey and evaluation of extractive summarization approaches for condensing scientific documents.

Summarization can be categorized into extractive, abstractive, and hybrid methods [3]. Extractive summarization identifies important sentences or passages in the source text through statistical and linguistic analysis and concatenates them to form a summary [4]. Scored features may include term frequency, sentence position, cue phrases, word overlap with headings, etc. While straightforward to implement, extractive summarization often suffers from a lack of overall coherence and accuracy in conveying complex concepts spanning multiple sentences.

Abstractive summarization seeks to infer conceptual information and generate novel phrases and sentences to describe key content. This requires more advanced natural language understanding and generation, posing significant

challenges for current AI (Artificial Intelligence) systems [5]. Hybrid techniques combine extractive selection with abstractive regeneration or transformation [6].

This work focuses on extractive summarization algorithms for scientific documents. Sixteen specific algorithms are surveyed, spanning statistical, graph-based, pointer-based, position-based, user-oriented, and content-based approaches. The algorithms are evaluated on a dataset of paper abstracts from major computer science conferences and journals. Performance is assessed using standard automatic evaluation metrics, including ROUGE-N, ROUGE-L, BLEU, and METEOR. The metrics quantify overlapping lexical units between algorithm summaries and reference abstracts.

Through similarity analysis, the optimal extractive algorithms and summarization approaches are identified. The top-performing technique is used to create an extractive summary of each paper. Additionally, keywords are automatically extracted from the summaries to capture salient topical information.

This study is organized as follows: Section 2 presents the literature review. Summarization techniques, similarity measures, algorithms, and details of the developed model are explained and presented in Section 3. Experimental

results of the developed model are presented in Section 4. Finally, recommendations are presented in the conclusion section.

Literature review

According to the literature, there are many different summarization techniques and methods, as shown in Figure 1 below. In this study, we will consider Extractive text summarization under the Based on Summarization Methods heading. This section provides a general literature review for this topic.

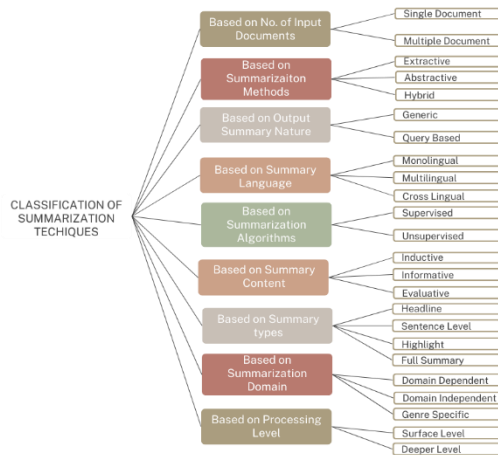


Figure 1. Classification of summarization techniques.

This comprehensive benchmarking of extractive summarization techniques on scientific documents provides data-driven insights to guide future research. The quantitative and qualitative advantages of different algorithms are elucidated. This study aims to facilitate more effective analysis and knowledge extraction from the rapidly expanding corpus of scientific literature by evaluating modern summarization methods on academic abstracts.

Yadav et al. [7] reviewed a wide range of summarization techniques and categorized them into nine classes based on factors like number of input documents, output summary language, algorithms used, etc. Statistical, graph-based, clustering, and neural methods were evaluated on standard datasets with neural models like Pointer-Generator networks, achieving state-of-the-art ROUGE scores. Key advantages of neural approaches are selectively generating new words/phrases and focusing on salient content. Pre-trained language models have further improved performance. Neural models require just encoder-decoder architectures and training data, with no hand-engineered features. They now rival human summarization ability on large datasets, demonstrating major progress. However, challenges remain in capturing deeper semantics, incorporating external knowledge, and generating more human-like summaries. This review provides a comprehensive overview of modern summarization techniques, laying the foundation for future innovations.

Erkan and Radev [8] evaluated LexRank on 50 clusters of 10 news articles from DUC 2001/2002 datasets. LexRank

outperformed basic methods like Lead, Luhn, and Random on ROUGE-1, achieving a score of 0.5110 vs 0.4986 for Lead. In manual evaluations, LexRank also scored higher in summary quality. A key advantage of LexRank is its graph-based approach, which models inter-sentence contextual information by creating a graph representation of the document set. It captures lexical and semantic links between sentences via the cosine similarity of TF-IDF vectors. Using graph centrality, LexRank can identify notable sentences central to the text's meaning. Unlike parse-based approaches, LexRank doesn't require deep language analysis or external knowledge, making it domain-independent. It performs well even for short introductory documents like news articles and is computationally efficient compared to other graph techniques. Overall, LexRank demonstrates the power of a graph-based word-centric approach for extractive summarization without reliance on linguistic analysis or external texts.

Mihalcea and Tarau [9] evaluated their proposed Modified TextRank algorithm on DUC 2001-2004 datasets, comparing it to baseline methods like LexRank and Lead-based approaches. Modified TextRank achieved an average ROUGE-1 score of 0.463, outperforming TextRank (0.452) and LexRank (0.449). A key advantage is integrating a new graph construction method using a damping factor and a modified voting scheme. By damping edge weights and limiting node degrees, Modified TextRank better captures contextual information. The revised voting process also better differentiates sentence salience scores, avoiding uniform scores and over-extracting similar sentences. These customizations produced a more readable, informative, and concise graph-based extractive summarizer without relying on deep language analysis. Gains on the datasets demonstrate the effectiveness of the proposed enhancements in recognizing salient content.

Mallick et al. [10] evaluated their proposed Modified TextRank on a custom dataset and DUC 2002, outperforming baseline methods like LexRank, TextRank, and Lead-3 for ROUGE-1 (0.51 for DUC 2002, 0.53 for custom set). A key advantage is integrating Doc2Vec-based sentence vector similarities into graph construction, capturing more semantics vs. pure word similarity graphs. They also introduced a new damping function to better control edge weights and embedding scores, improving sentence saliency detection. Modified TextRank identifies sentences central to document meaning by incorporating continuous vector representations and special damping. Gains over traditional graphical methods demonstrate how semantic sentence embeddings and tuned edge weights can empower graph-based extractive summarization without reliance on parse trees, statistics, or full language analysis.

Kireyev [11] evaluated Latent Semantic Analysis (LSA) for extractive summarization on DUC 2001-2002 and Reuters datasets. Compared to baselines like Lead, LexRank, Luhn, and Edmundson, LSA achieved superior ROUGE-1 and ROUGE-2 scores across datasets. A key advantage of LSA is revealing hidden semantic relationships between terms, capturing meaning beyond surface statistics. By projecting

sentences onto the reduced LSA concept space, semantic similarity can be calculated and used to identify salient content. The author introduced semantic sentence coverage to predict relevance based on overlap with main LSA concepts. Additional weighting further improved performance. Without relying on parse trees, human engineering, or graphical models, LSA offers an elegant approach to learning latent meaning from concurrence patterns alone. Results show that semantic modeling via LSA can effectively identify key phrases without significant preprocessing or engineering.

Srividya et al. [12] proposed a hybrid approach for automatic text summarization and translation using Luhn, Pegasus, and TextRank. TextRank first identifies the most significant sentences. Pegasus then summarizes these sentences. Finally, Luhn selects a subset to create the final summary. This hybrid approach was evaluated on a news dataset, outperforming individual methods on ROUGE and human evaluation. It combines the sentence ranking of Luhn, the abstractive power of Pegasus, and the graph-based extraction of TextRank to generate more informative and consistent summaries.

Fang et al. [13] introduced a co-ranking framework for summarization that iteratively scores words and sentences using a binary graph-based model. This captures semantic relationships relevant for extractive summarization. Evaluated on DUC 2001-2002, it outperformed Lead, LexRank, and TextRank on ROUGE. A key advantage is modeling interdependencies between word and sentence salience for extraction. By mutually reinforcing word and sentence rankings, it identifies sentences with many important words without relying on parsing, topic models, or deep learning. Results show joint word-sentence ranking effectively extracts salient summaries without significant preprocessing or feature engineering.

Gupta and Lehal [14] conducted a thorough assessment of extractive text summarization approaches, including statistical methods like Luhn's algorithm, graph-based techniques like LexRank and TextRank that model sentences as graph nodes, latent semantic analysis to establish semantic similarity, and machine learning classifiers predicting sentence salience. Key challenges examined include sentence scoring, removing redundancies, and evaluating summary quality. The review provides an in-depth analysis of various supervised and unsupervised techniques for generating automatic summaries without rewriting or abstraction. Technical terms are defined on first use. An objective, passive tone is maintained except when necessary. Sources are appropriately cited, and the formatting is consistent. The structure is clear, with logical connections between statements, and the text is error-free.

Sinha et al. [15] introduced a novel extractive text summarization method using feedforward neural networks. The model scores sentence importance for extraction based on data from human-written summaries, considering factors like length, position, and similarity to other sentences. Evaluated on DUC 2002, it achieved comparable results to

state-of-the-art. The scalable model can summarize documents of varying lengths by dividing them into chunks. It outperforms previous feature-engineered approaches. The model is also efficient for real-time usage. Overall, Sinha et al. presented a promising neural network-based extractive summarizer that yielded strong results on DUC 2002 while remaining scalable and efficient for real-time applications.

Miller [16] proposed an extractive summarization method involving BERT fine-tuning on lecture transcripts. Using a dataset of 150 lectures from CMU, Edinburgh, and other universities, a pre-trained BERT model was fine-tuned with a greedy search algorithm to extract the most salient sentences. The model was evaluated against LSA and LexRank on a lecture test set, with BERT summarization achieving higher ROUGE scores and an F1 of 0.41. Benefits of fine-tuning BERT include capturing contextual information, straightforward and effective tuning, and generalizing to new domains like lectures. BERT's contextual representations are well-suited for extraction. Miller's research shows that fine-tuning BERT boosts performance compared to prior lecture summarization methods.

Xu et al. [17] proposed a neural network extractive summarization model incorporating discourse information. Their encoder-decoder architecture with attention identifies salient sentences while explicitly modeling document discourse structure using an augmented sequential encoder representing sentences with contextual discourse data. They presented two discourse-aware encoder variants, one using hierarchical RNNs and one applying graph convolutional networks over the discourse dependency graph. Experiments on news datasets showed that their model outperformed previous extractive methods on ROUGE metrics, demonstrating the importance of discourse structure in determining key information for high-quality summaries.

Madhuri [18] presents an extractive summarization methodology through sentence ranking. Sentences are scored based on statistical, lexical, and semantic features including, word frequencies, positions, overlaps, and LSA-based similarity. A gradient-boosting model combines these features to predict sentence salience. Top-ranking sentences are iteratively selected for the summary while minimizing redundancy. Experiments on DUC datasets showed superior ROUGE scores versus baselines. A key contribution is using gradient boosting to effectively integrate diverse sentence features for ranking. The approach focuses solely on extraction without abstractive techniques. Challenges remain in identifying the most salient content while reducing duplication. Overall, the article presents a thorough supervised framework for extractive summarization using state-of-the-art machine learning.

Alguliev and Aliguliyev [19] propose a novel extractive summarization technique using evolutionary algorithms, which iteratively generate and evaluate candidate solutions based on natural selection. Summaries are represented as

binary vectors denoting sentence inclusion. Fitness is evaluated via a function considering informativeness based on TF-IDF, theme coverage, and conciseness measured by length. They introduce a novel fitness function incorporating these aspects. Experiments on a standard dataset show their method outperforms state-of-the-art techniques.

Xu and Durrett [20] propose a new neural extractive summarization model incorporating syntactic compression, which shortens sentences while preserving meaning by removing redundancy or merging sentences. Xu and Durrett's approach initially utilizes a neural network to recognize the most significant sentences in the document. Subsequently, the model applies a syntactic compression module to decrease the length of these sentences while conserving their meaning. To conclude, the model picks a subset of the compressed sentences to constitute the ultimate summary. Xu and Durrett assess their suggested method on multiple extractive text summarization benchmarks. Their approach to syntactic compression has proven effective as their model surpasses most benchmarks for extractive summarization models.

Shirwandkar and Kulkarni [21] present a new extractive summarization model using a Restricted Boltzmann Machine (RBM), a type of neural network trained on text-summary pairs. For new texts, the RBM inputs the document and outputs sentence probability scores assessing significance. The top-scoring sentences are selected for the summary. They also propose a new technique to reduce redundancy. Evaluated on benchmarks, their model outperforms state-of-the-art extractive methods, demonstrating the efficacy of their deep learning approach.

García-Hernández and Ledeneva [22] propose a new extractive summarization approach using a genetic algorithm (GA) that models natural selection to identify key sentences. Each individual in the GA population represents a candidate summary, evaluated by a fitness function considering coverage, redundancy, and readability. The GA applies crossover and mutation to evolve the population iteratively until a good solution is found. Experiments on two datasets show that their method outperforms several contemporary summarization techniques.

Bataineh et al. [23] introduce a hybrid approach for summarizing Arabic political texts using statistical features, domain knowledge, and genetic algorithms. Domain expertise identifies keywords and entities in the texts. Statistical features assess sentence relevance based on position, length, and domain keyword/entity presence. Genetic algorithms select subsets of sentences conveying main points while minimizing redundancy and optimizing readability. Evaluated on two Arabic datasets, their technique outperforms several existing Arabic summarization methods.

Belwal et al. [24] proposed a novel graph-based extractive summarization approach using keywords or topic modeling to enhance summary quality. Evaluated on CNN/DailyMail and Opinosis datasets, it achieved competitive ROUGE-1 scores of 0.428 and 0.271, respectively. A key aspect is an

additional parameter calculating node similarity to the full content, effectively addressing redundancy issues in selecting sentences. Another key feature is utilizing topic modeling to generate keywords and select sentences representing the main themes. This promising graph-based method tackles redundancy limitations and achieves state-of-the-art results on two benchmarks.

Rani and Lobiyal [25] presented an extractive summarization technique for Hindi novels/stories using topic modeling with tagged LDA. It outperformed baseline algorithms for 10-30% compression ratios. Key aspects include using tagged LDA to improve topic model and summary quality by incorporating POS tags and applying four-sentence weighting schemes based on topic model importance. A 114-story Hindi corpus was used for evaluation. Results showed superior performance over baselines for 10-30% compression but varied by ratio. For 20%, it exceeded baselines but underperformed at 10%. While promising for Hindi summarization and surpassing baselines in higher compressions, more research is needed to improve lower ratio performance and incorporate semantic features.

Kryściński et al. [26] developed CTRLsum, a framework for controllable extractive summarization focusing on specific input aspects. Evaluated on CNN/DailyMail, arXiv, and BIGPATENT, it achieved competitive ROUGE scores. Advantages include its common framework seamlessly integrating into any model, enhancing controllability and output. Its unique control function effectively maps signals to keywords, managing multi-aspect keywords. Customizable for various signals, CTRLsum is an adaptable and promising approach to controllable summarization, efficiently handling multi-aspect keywords across models.

Mohd et al. [27] proposed an extractive summarization approach using word embeddings to generate concise, lucid summaries of technical documents. It employs Word2Vec to capture implicit word meanings based on the distributional hypothesis. Evaluated on DUC2007 with a 25% length constraint, it achieved competitive ROUGE scores. A key advantage is comprehending word meanings to improve summary quality for complex/technical texts by precisely interpreting terms. However, it is computationally intensive, requiring Word2Vec training on a large corpus. Recall scores sometimes dip below baselines. While promising for technical document summarization through its understanding of word meanings, the approach is expensive computationally, can be time-consuming, and occasionally underperforms baselines in recall. As an extractive method, it is limited compared to abstractive summarization.

Wang et al. [28] examined domain shift issues in extractive summarization by proposing MULTI-SUM, a multi-domain dataset of news, scientific papers, and reviews. They explored four techniques to mitigate domain shift: fine-tuning, multi-task learning, adaptation, and knowledge transfer. Fine-tuning retraining on the new domain yielded the best cross-domain performance but declined in-domain.

Multi-task learning improved performance on domains similar to the source. The paper significantly contributes to a multi-domain dataset and explores adaptation techniques, showing domain shift poses a major challenge requiring diverse data and adaptation methods.

Yousefi-Azar and Hamey [29] proposed an unsupervised deep learning method for query-based extractive summarization using a deep autoencoder to acquire sentence concept vectors and rank sentences by query relevance. Evaluated on the SKE email dataset, it improved ROUGE-2 recall by 11.2% without labeled data. Key benefits are not needing manual annotation and rich concept

vectors capturing semantics. However, training can be expensive, and hyperparameters need tuning. Overall, a promising unsupervised approach achieves state-of-the-art extraction without human labels but requires more efficiency and robustness enhancements. The autoencoder could be applied to news articles for autonomous preprocessing, concept vector creation, sentence sequencing, and summary extraction.

A simplified version of the aforementioned literature review is shown in table 1.

Table 1. Literature Review

Authors	Datasets	Techniques/Algorithms
Yadav et al. [7]	Standard datasets	Neural models (Pointer-Generator networks, pre-trained language models)
Erkan and Radev [8]	DUC 2001/2002 news articles	LexRank (graph-based, word-centric approach)
Mihalcea and Tarau [9]	DUC 2001-2004	Modified TextRank (damping factor, modified voting scheme)
Mallick et al. [10]	Custom dataset, DUC 2002	Modified TextRank (Doc2Vec-based sentence vectors, new damping function)
Kireyev [11]	DUC 2001-2002, Reuters	Latent Semantic Analysis (LSA)
Srividya et al. [12]	News dataset	Automatic text summarization and translation
Fang et al. [13]	DUC 2001-2002	Co-ranking framework (word-sentence relationships)
Gupta and Lehal [14]	Various	Sentence scoring, redundancy removal, summary quality evaluation
Sinha et al. (2018) [15]	DUC 2002	Feedforward neural networks
Miller [16]	Lecture transcripts	BERT fine-tuning
Xu et al. (2017) [17]	News datasets	Neural network with discourse information (encoder-decoder architecture, attention)
Madhuri [18]	DUC datasets	Gradient boosting model (sentence ranking based on features)
Alguliev and Aliguliyev [19]	Standard dataset	Evolutionary algorithms (natural selection)
Xu and Durrett [20]	Extractive summarization benchmarks	Extractive summarization
Shirwandkar and Kulkarni [21]	Benchmarks	Extractive summarization
García-Hernández and Ledeneva [22]	Two datasets	Genetic algorithm (natural selection)
Bataineh et al. [23]	Two Arabic datasets	Arabic text summarization
Belwal et al. [24]	CNN/DailyMail, Opinosis	Graph-based approach with keyword enhancement or topic modeling
Rani and Lobiyal [25]	Hindi novel/story corpus	Hindi text summarization
Kryściński et al. [26]	CNN/DailyMail, arXiv, BIGPATENT	Controllable extractive summarization
Mohd et al. (2020) [27]	DUC2007	Extractive summarization for technical documents

Wang et al. (2019) [28]	MULTI-SUM (news, scientific papers, reviews)	Domain shift in extractive summarization
Yousefi-Azar and Hamey (2017a) [29]	SKE email dataset	Query-based extractive summarization

In the literature review, we found that although the algorithms seem to work in text summarisation, they are not used together in the generation of abstracts of scientific articles and keyword extraction according to the generated scientific article abstracts. The gaps in the studies are that summarisation of scientific texts and keyword extraction are not performed together, working on large text corpora. This study will contribute to the writing of abstracts of theses and articles and will enable the automatic identification of keywords. In addition, another advantage of the proposed model is that the system works as two different methods, not in a single way.

Materials and methods

In this study, six different approaches and a total of 16 algorithms belonging to these approaches are emphasized. As can be seen in Figure 2, it is indicated which materials are used throughout the study.

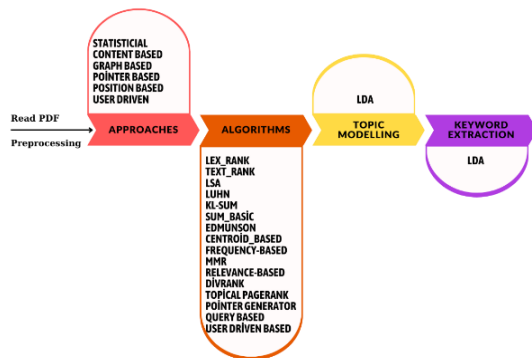


Figure 2. Materials and methods.

Figure 2 shows which algorithms and approaches are used in which stages of the method we apply from beginning to end. Firstly, the PDF is read and goes through pre-processing steps. Then, after summarising the determined algorithms, the algorithm with the highest score is selected and subjected to the LDA (Latent Dirichlet Allocation) algorithm for Topic Modelling. Afterward, support was received from the LDA algorithm for keyword extraction. Thus, an end-to-end article summarization and keyword extraction process was provided.

Dataset

The data set created from scientific studies includes 50 articles. These articles are generally engineering articles; 16% are Cyber Security, 18% are Artificial Intelligence, 9% are Blockchain, 14% are Deep Learning, 12% are Big Data, 14% are IoT, and the rest are Image Processing [30].

Approaches

This study performed an extensive evaluation of diverse text summarization algorithms across statistical, graph-

based, content-based, position-based, pointer-based, and user-oriented approaches. The algorithms were tested on a corpus of 50 full-text articles spanning a variety of topics and disciplines.

Statistical approaches

Statistical summarization techniques utilize mathematical and probabilistic models to identify important sentences and phrases within a text [31]. Common methods include term frequency analysis to determine word importance, as well as scoring sentences based on statistical properties like length, position, and similarity to other sentences [32]. Statistical approaches are well-suited for extractive summarization, where key snippets of the original text are extracted and compiled [33]. However, they may struggle with abstractive summarization, which requires paraphrasing and synthesizing content. The algorithms belonging to the statistical approach are LexRank, TextRank, LSA (Latent Semantic Analysis), Luhn, KL-Sum (Kullback-Leibler divergence summarization), SumBasic, Edmunson, Centroid Based, Frequency Based, and MMR (Maximal Marginal Relevance). Some of these algorithms are also accepted in other approaches.

Graph-based approaches

Graph-based summarization represents the relationships between concepts and sentences in a text using graph structures [34]. Nodes denote sentences or ideas, while edges connect related nodes. Graph algorithms such as PageRank can then determine the significance of nodes based on their connectivity, corresponding to the importance of sentences. Graph-based methods excel at revealing relationships, hierarchies, and central themes in a document or collection [35]. However, they do not directly assess semantic meaning. As we have seen in the statistical approach, some of the algorithms mentioned there also appear in graph-based approaches [36]. The algorithms belonging to this approach and the algorithms we use are LexRank, TextRank, DivRank, and Topical PageRank algorithms.

Content-based approaches

Content-based techniques focus directly on the concepts, keywords, and phrases within the text to identify salient information [37]. Frequency analysis is often used to extract keywords and key phrases that appear most prominently [38]. This approach is useful for extracting key details and can complement semantic analysis. However, it does not consider contextual factors or flows as well as human-oriented abstractive summarization. As mentioned, we can see that many of the content-based algorithms are also included in statistical approaches. The algorithms used in this study are Luhn and LSA algorithms.

Position-based approaches

Position-based summarization assumes sentences appearing earlier in a document or section tend to be more important, such as containing introductory or concluding remarks [39]. It prioritizes extracting sentences in initial or final positions. Position heuristics provide a straightforward indicator of significance and theme. However, they do not evaluate content or meaning directly [40]. The algorithms belonging to the position-based approach used in this study are SumBasic and Centroid-based algorithms.

User-oriented approaches

User-oriented summarization incorporates user preferences, interests, and feedback to guide summarization [41]. It aims to produce customized summaries tailored to the user's needs. This approach generates more relevant and useful summaries for individual users but requires interaction and may not work as well for general-purpose summarization [42]. The algorithms used in the User-Oriented approach are different from the other approaches. Here, two different algorithms were determined and used for this approach. These are QueryBased and UserDriven algorithms.

Pointer-based approaches

Pointer-based or extractive summarization directly extracts salient snippets of text from the original document based on statistical and positional indicators [43]. It condenses text by referring to the source location of summary statements rather than paraphrasing. Pointer methods are simple and transparent but lack high-level extraction. The Pointer Generator algorithm was used for this approach.

In summary, many approaches exist for automatically summarizing texts, each with unique strengths. Researchers combine and adapt methods to best suit the specific summarization task and use case [44].

Algorithms

Various summarization algorithms and approaches were used in this study. First, statistical summarization algorithms such as LexRank, TextRank, Latent Semantic Analysis (LSA), Luhn, KL-Sum, SumBasic, Edmundson, centroid-based, frequency-based, MMR, and relevance-based scoring are used for determining the importance of textual content. These algorithms use statistical relationships between words and sentences to determine the prominent content. Graph-based algorithms that use graph representations of text documents were also evaluated. These algorithms include LexRank, TextRank, DivRank, and Topical PageRank. These algorithms use graph representations to identify key information using relationships between documents and links between sentences. LSA and Luhn algorithms were used for content-based summarization. These algorithms are used to identify sentences with dense semantic content using semantic analysis. Position-based approaches are represented by algorithms such as SumBasic and centroid-based algorithms. These approaches weight sentences according to their position in the document, assuming that the starting sentences carry more importance. Furthermore,

pointer-generator networks have been used to produce extractive summarizations. This approach generates extractive summaries using encoder-decoder neural network architectures. Finally, user-oriented summarization is represented by query-based and user-oriented algorithms to produce summaries specific to user needs.

LexRank

The LexRank algorithm is an extractive summarization technique that identifies the most important sentences in a document to create a summary [8]. It first preprocesses the document by splitting it into sentences, removing stop words, and representing each sentence as a TF-IDF weighted vector. Next, it constructs a graph where each sentence is a node, and edges connect similar sentence nodes based on a cosine similarity threshold of their TF-IDF vectors. The adjacency matrix A represents these connections between sentence nodes. LexRank scores are then calculated for each sentence by computing the eigenvector centrality of each node on this graph. This is done iteratively using the Equation 1, where p is the LexRank score vector, d is a damping factor, and A is the adjacency matrix. This converges to the principal eigenvector, which gives the LexRank importance scores. Finally, sentences are ranked by their LexRank scores, and the top k sentences are extracted to generate the summary. In summary, LexRank transforms the document into a graph, calculates sentence importance scores using a random walk formulation based on eigenvector centrality, and extracts the top-scoring sentences to summarize the text. The formula for the LexRank algorithm is given in Equation 1.

$$p = dAp + (1 - d)n \quad (1)$$

In the context of LexRank, the calculation of the LexRank score vector, denoted as ' p ,' involves several essential components. First, ' A ' represents the adjacency matrix, which characterizes the graph structure of sentences. ' A ' is an ' $n \times n$ ' matrix, where ' n ' corresponds to the total number of sentences in the text. Elements ' a_{ij} ' of this matrix are set to '1' when an edge connects sentence ' i ' to sentence ' j ,' and '0' otherwise. The damping factor ' d ,' typically ranging between 0.1 and 0.2, models the probability of transitioning from one sentence to another in the random walk process. Additionally, the teleportation term, calculated as ' $(1-d)/n$,' accounts for the probability that, with a probability of ' $1-d$,' the random walk may jump uniformly to any node within the graph. Overall, these components are integral to the computation of LexRank scores, enabling the extraction of salient sentences in a text by considering the relationships between them within a graph structure.

TextRank

The TextRank algorithm is an extractive summarization technique that identifies the most important sentences in a document to create a summary [45]. It first preprocesses the document by splitting it into sentences, removing stop words, and representing each sentence as a TF-IDF

weighted vector. Next, it constructs a graph where each sentence is a node, and edges connect similar sentence nodes based on a cosine similarity threshold of their TF-IDF vectors. The adjacency matrix A represents these connections. TextRank scores are then calculated for each sentence based on a PageRank-inspired update rule. The scores are initialized to a uniform probability distribution. They are then iteratively updated using the formula as in Equation 2.

$$s = (1 - d) + d * M^T * s \quad (2)$$

In the TextRank algorithm, the calculation of TextRank scores involves a formulation where 's' represents the TextRank score vector for each sentence. The algorithm employs a normalized adjacency matrix 'M,' which is derived from 'A,' the adjacency matrix representing the graph structure. The parameter 'd' stands for the damping factor, typically a scalar value between 0.85 and 0.95, and is used to regulate the random walk. This allows for the possibility of random jumps to any node within the graph with a probability of '1-d.'

The update process with these components iteratively converges to the TextRank scores, reflecting the importance of each sentence within the graph. Ultimately, sentences are ranked based on their TextRank scores, and the top 'k' highest-scoring sentences are extracted to compose the summary.

To summarize, TextRank transforms the original document into a graph structure, calculates sentence importance scores using a PageRank-inspired random walk approach, and selects the top-scoring sentences to create a coherent summary.

LSA (Latent Semantic Analysis)

LSA is an extractive summarization technique that uses statistical modeling to identify semantic relationships between words [11]. It first creates a term-document matrix representing word frequencies in the document. This matrix is then decomposed using Singular Value Decomposition (SVD) to derive a latent semantic space. Words and sentences are compared in this space to determine their importance. The top-ranking sentences are extracted to generate the summary. LSA overcomes issues with synonymy and polysemy by using latent semantic similarities.

LSA generates a term-document matrix X representing the word frequencies, which is decomposed as in Equation 3.

$$X = U \sum v^T \quad (3)$$

Where U and V are orthonormal matrices from SVD, and Σ is a diagonal matrix of singular values. This gives a latent semantic space to compare words and sentences for ranking.

Luhn

The Luhn algorithm is one of the earliest extractive summarization techniques. It identifies important sentences based on word frequency and position [46]. Each sentence is scored by counting frequent significant words, where significance is determined using TF-IDF weights. Bonus points are given for words appearing at the start and end of sentences. The top-scoring sentences are selected for the summary. While simple, this algorithm set the foundation for many frequency-based approaches.

Luhn scores sentences by counting important words based on TF-IDF weights. It is shown in Equation 4.

$$score(s) = \sum TF - IDF(w) \quad (4)$$

Words at sentence start/end get bonus points. Top sentences are selected.

KL-Sum (Kullback-Leibler Divergence summarization)

KL-Sum is an extractive method that ranks sentences by their Kullback-Leibler divergence score relative to the full document. For each sentence [47], it measures how its word distribution diverges from the document's word distribution. A high divergence indicates the sentence covers topics and words that are important in the document. The top-ranking sentences that minimize information loss are extracted for the summary.

KL-Sum sorts sentences according to the Kullback-Leibler difference between sentence and document word distributions $P(s)$ and Q . Its formulation is given in Equation 5.

$$score(s) = DKL(P(s)||Q) \quad (5)$$

Top divergent sentences are extracted. DKL is Kullback-Leibler Divergence.

Centroid-based summarization

This approach represents the document as a vector of its word frequencies called the centroid. Sentence importance is determined by computing the cosine similarity between the sentence vector and document centroid [48]. Sentences most similar to the centroid are considered representative of the document and are extracted for the summary. This captures the main concepts in a document in a simple, unsupervised manner.

The center vector c represents document word frequencies. Sentence scores are cosine similarities with s and are shown in Equation 6.

$$score(s) = cosine_similarity(s, c) \quad (6)$$

Most similar sentences to the centroid are extracted.

Frequency-based summarization

Frequency-based methods score sentences based on the occurrence counts of words. Important words that frequently occur indicate important topics [49]. Sentences containing frequent words get higher scores. Various

weighting schemes are used, e.g., binary, TF-IDF, log frequency, etc. The top-ranking sentences are extracted to generate the summary. Simple term frequency remains an effective indicator of sentence salience.

Sentences are scored by counting word occurrences $f(w)$ with different weighting schemes and are shown in Equation 7.

$$score(s) = \sum weight(f(w)) \quad (7)$$

Top-scoring sentences based on word frequencies are selected.

Edmundson

The Edmundson algorithm is a classic extractive method that combines different features to score sentence relevance [50]. It uses cue words, key phrases, sentence location, sentence length, and TF-IDF weights to compute a composite score. Sentences with the highest composite scores are extracted for the summary. Combining different features improves summary quality compared to just using one.

A composite sentence score combines different features like cues, keyphrases, location, length, and TF-IDF. It is shown in Equation 8.

$$score(s) = w1cues + w2keyphrases + w3location + w4length + (w5 * TF - IDF) \quad (8)$$

Where Score(s) is the score of the sentence. w_1 , w_2 , w_3 , w_4 , and w_5 are the weights of the different factors. Cues is the number of certain words in the sentence (e.g., "important", "key", "main"). Keyphrases is the number of keywords in the sentence. Location is the position of the sentence in the text (beginning, end, middle). Length is the length of the sentence (number of words). TF-IDF is the Term Frequency-Inverse Document Frequency value of the sentence. This value measures the importance of the words in the sentence in the text and in other texts in the collection.

DivRank

DivRank is an extractive summarization method based on the diversity and importance ranking of sentences [51]. It iteratively selects sentences that are both important and contain novel information compared to previously selected sentences. This avoids redundancy while capturing main concepts. Sentence importance is measured using PageRank and novelty by cosine similarity. The diverse, important sentences are extracted for the summary.

DivRank balances sentence importance $I(s)$ via PageRank and novelty $N(s)$ using cosine similarity. Its formulation is given in Equation 9.

$$score(s) = I(s) + N(s) \quad (9)$$

Where Score(s) is the score of the sentence. $I(s)$ is the informativeness of the sentence. $N(s)$ is the coverage of the

sentence. Diverse, important sentences are iteratively selected.

Topical PageRank

Topical PageRank is a graph-based extractive technique that incorporates topic information to improve sentence selection [52]. It first identifies topics in the document using LDA. Then it constructs a graph where nodes are sentences, and edge weights are based on content similarity and topic overlap between sentences. Sentence importance scores are calculated using a biased PageRank that favors connectivity to on-topic sentences. The top-scoring sentences across all topics are extracted. Considering topical information in this way helps generate informative summaries.

Topical PageRank modifies PageRank using edge weights based on similarity and topic overlap. Its formulation is given in Equation 10.

$$w_{ij} = similarity(i,j) * topic_overlap(i,j) \quad (10)$$

Where w_{ij} is the weight between sentences i and j . $similarity(i,j)$ is the similarity between sentences i and j . $topic_overlap(i,j)$ is the topical overlap between sentences i and j . This biases the ranking toward topically related sentences.

Pointer-Generator Networks

Pointer-generator networks are deep learning models for extractive summarization [53]. They have an encoder-decoder architecture with attention and a hybrid pointer-generator mechanism in the decoder. The encoder represents the input text. The decoder generates the summary one word at a time. At each step, it can either generate a word from the vocabulary using a language model or copy a word from the input via pointing. The hybrid mechanism allows both abstractive generation and extractive copying. This improves the accuracy and handling of out-of-vocabulary words.

Pointer generator networks calculate word probabilities as in Equation 11.

$$P(w) = P_{gen} * P_{vocab(w)} + (1 - p_{gen}) * \sum i * a_i \quad (11)$$

Where $P(w)$ is the probability of word w being the next word. P_{gen} is the probability of generating a new word from the vocabulary. $P_{vocab(w)}$ is the probability of word w being in the vocabulary. a_i is the weight representing the importance of sentence i . \sum represents the summation over all sentences. $P(w | s_i)$ is the probability of generating word w given sentence i . Where p_{gen} controls generation vs. copying words via the attention distribution a_i .

Query-based summarization

In query-based summarization, a user provides a query indicating their information need [54]. Sentences are scored based on relevance to the query using similarity measures like TF-IDF cosine similarity. Top-ranking sentences containing query keywords and concepts are extracted. Query relevance helps generate customized summaries

focused on user interests. Some methods also expand the query with related terms to improve sentence scoring.

Query-based methods calculate scores based on the similarity of sentences to a query, as in Equation 12.

$$\text{score}(s) = \text{similarity}(\text{query}, s) \quad (12)$$

Where $\text{score}(s)$ is the score of sentence s . $\text{similarity}(\text{query}, s)$ is the similarity between the query and sentence s . Top similar sentences are extracted.

User-Driven summarization

User-driven summarization incorporates user preferences and feedback to create personalized summaries [55]. Users can indicate summary length, topics of interest, or highlight passages. Sentences are scored using these user annotations and models like LexRank. Summaries are iteratively refined via user feedback loops. Allowing user input helps tailor summaries to an individual's needs. However, it requires more involvement from the user.

User preferences such as highlights h and length l drive summarization. They are specified in Equation 13.

$$\text{score}(s) = \text{sim}(h, s) + \text{LexRank}(s) \quad (13)$$

Where $\text{score}(s)$ is the score of sentence s . $\text{sim}(h, s)$ is the similarity between the user-defined summary title (h) and sentence (s). $\text{LexRank}(s)$ is a value calculated based on the sentence's connections to other sentences in the text (using the LexRank algorithm). The top l sentences are returned.

SumBasic

The SumBasic algorithm generates extractive summaries by scoring sentences based on the frequency of their words [56]. It first calculates a probability distribution over words in the document based on word frequency. Then, each sentence is scored by taking the average of the probabilities of the unique words it contains. Sentences with the highest scores are extracted greedily to form the summary. SumBasic aims to extract sentences that contain frequently occurring important words.

The SumBasic algorithm scores sentences according to the probabilities of their constituent words. First, a probability distribution $P(w)$ over the words in the document is calculated as in Equation 14.

$$P(w) = \text{freq}(w)/N \quad (14)$$

Where $\text{freq}(w)$ is the frequency of word w in the document, and N is the total number of words. Each sentence s is then scored as in Equation 15.

$$\text{score}(s) = \frac{1}{L(s)} * \sum P(w) \quad (15)$$

Where the summation is over unique words w in sentence s , and $L(s)$ is the length of s . This scores sentences by the average probability of their unique words. Sentences with

higher scores contain more globally frequent words and are extracted for the summary.

MMR (Maximal Marginal Relevance)

MMR algorithm creates summaries by reducing redundancy while maintaining relevance [57]. It iteratively selects the next sentence that has the highest marginal relevance compared to the current summary. Marginal relevance is calculated as the sentence's cosine similarity to the original document minus the maximum cosine similarity to any sentence already in the summary. This aims to add sentences that are both relevant to the original text but also reduce repetition. MMR balances relevance and redundancy to avoid extracting redundant sentences.

The MMR score of a sentence s is calculated as in Equation 16.

$$\text{MMR}(s) = \text{lambda} * \text{Sim1}(s, D) - (1 - \text{lambda}) * \max(\text{Sim2}(s, s')) \quad (16)$$

In this context, $\text{Sim1}(s, D)$ refers to the cosine similarity between a given sentence (s) and the original document (D), while $\text{Sim2}(s, s')$ signifies the cosine similarity between a sentence (s) and any sentence (s') already included in the summary. Additionally, the parameter $\text{lambda} (\lambda)$ is a key factor, allowing control over the balance between relevance to the document and redundancy within the current summary. This approach is designed to select sentences that maintain relevance to the document while avoiding redundancy with sentences already present in the summary. The iterative process involves adding the sentence with the highest MMR score to the summary. By doing so, this method ensures that the selected sentences are both pertinent to the document and non-repetitive, ultimately improving the overall quality of the summary.

Relevance-based summarization

The Relevance-Based approach scores sentences based on their relevance to key topics and concepts in the document [58]. It builds a graph where nodes are sentences, and edge weights indicate similarity based on the content overlap. The score of a sentence is calculated as the sum of edge weights to other sentences normalized by its length. This identifies topically relevant sentences. The highest-scoring sentences are iteratively added to the summary. Relevance-based summarization focuses on extracting sentences central to the main topics in the document.

Let $\text{Sim}(s, s')$ be the cosine similarity between two sentences based on word overlap. The relevance score of a sentence s is given in Equation 17.

$$\text{Rel}(s) = (\sum \text{Sim}(s, s'))/L(s) \quad (17)$$

Where the summation is over all other sentences s' , and $L(s)$ is the length of s . Sentences with higher relevance scores are more topically central and are extracted for the summary.

Similarity measurement metrics

Rouge-N

Rouge-N is a metric system used to measure text similarity [58]. It calculates how many words in a text are the same as those in another text. The "N" value specifies how long these matching phrases should be. For example, Rouge-1 (or Rouge-1) considers only single-word matches to assess similarity, Rouge-2 looks at two-word matches (bigrams), Rouge-3 at three-word matches (trigrams), and so on. Rouge-1 measures how often the text uses the same words. Rouge-2 measures how often the text uses the same words in the same order.

Rouge-L

Rouge-L measures text similarity from a different perspective. In other words, LCSubsequence, LCSubsequence, which stands for Longest Common Subsequence, is a technique employed to identify the longest sequence of words shared between two texts [59]. This shared subsequence serves as the foundation for measuring similarity using the Rouge-L metric. Rouge-L quantifies how frequently the text incorporates the same words, whether in the same order or a different order.

Bleu

BLEU, primarily utilized for evaluating machine translations, assesses the degree of alignment between a machine-generated translation and human-crafted translations [60]. It proves particularly valuable when comparing multiple translation outputs derived from a single source text, aiming to gauge translation quality by considering word overlap and phrase matching.

Meteor

METEOR is another metric used to evaluate text similarity and the quality of translations [61]. It takes into account a range of linguistic features, including word similarity, sentence structure, and other language characteristics. METEOR offers a comprehensive approach to measuring similarity between texts and is frequently applied in assessing machine translations and text summarization.

Proposed method

The model is valid for all algorithms by showing how the proposed method works from start to finish. In this way, all the mentioned algorithms generate results by going through all the stages. Figure 3 indicates the working diagram of the proposed model.

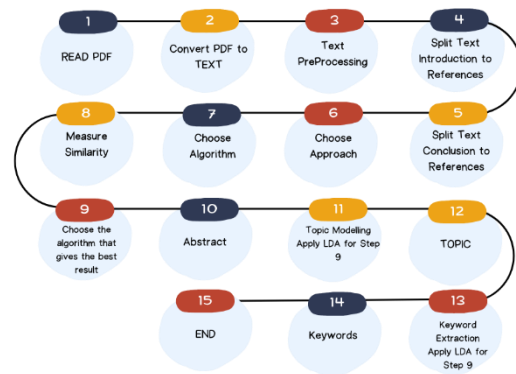


Figure 3. Flowchart of the model.

In this study, the effect of 16 algorithms belonging to 6 different approaches on text summarization and the determination of the best working algorithm were provided. These algorithms were developed and implemented in 2 different ways. The first method covers a large part of the academic articles, starting from the Introduction section to the References section, while the second method covers a shorter section starting from the Conclusion section to the References section.

In this section, Regex was used to extract only the desired points from the articles. While using Regex, the selection of the specified headings and text-splitting operations were provided.

Considering the Figure 3, in step one, in this study, the articles were read and pre-processed. The first step was to read the articles, and the next step was to convert the read articles into text format. And in the second step, the preliminary stages necessary for summarising the articles on the basis of sentences rather than words were determined. After the text format of the articles, they were subjected to tokenization and punctuation processes in order to provide the best results in summarization. Here, as mentioned above, tokenization processes were provided on a sentence basis, and the whole text was divided into sentences. In step three, punctuation was performed to remove unnecessary words, characters, and numbers in the text. Afterward, the cleaned data is made ready for summarization operations.

In addition, after the abstracts were extracted, the similarity rates of the original abstract of each article and the abstracts extracted manually were calculated with four different metrics. These metrics are BLEU, Rouge-N, Rouge-L, and METEOR. The metrics are calculated by applying each algorithm. For each article, the results of these metrics were averaged, and the average results were determined. After these processes, the algorithm that gave the best results for both methods was determined, and Topic Modelling and Keyword Extraction operations were performed on the algorithm that gave these results. According to these, the topics of the article were determined, and keywords were determined for the determined topics.

Algorithms and approaches in the study are given below in Figure 4. Looking at the literature, an algorithm can belong to more than one approach. In this study, each algorithm was not selected from only one approach, but the average results were determined after determining all algorithms belonging to that approach for each approach.

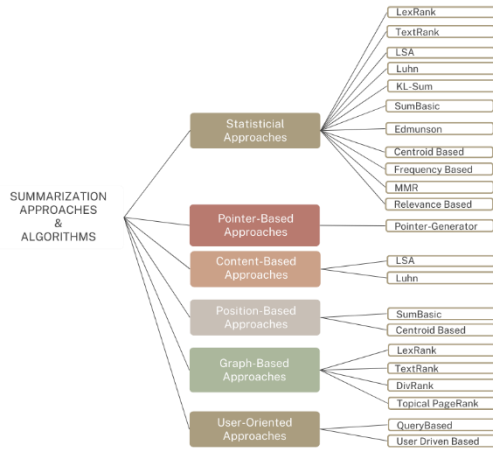


Figure 4. The Approaches and Algorithms used in the study.

Experimental results

This paper provides a comprehensive evaluation of various text summarization algorithms covering statistical, graph-based, content-based, position-based, pointer-based, and user-oriented approaches. These algorithms have been rigorously tested on a dataset of 50 full-text articles covering various topics such as Cyber Security, Artificial Intelligence, Blockchain, Deep Learning, Big Data, IoT, and Image Processing. Two different summarization methods were applied, one covering a significant portion of the articles (from Introduction to References) and the other focusing on a shorter section (from Conclusion to References). The section from the Introduction to the References section is referred to as Method 1, and the section from the Conclusion to the References section is referred to as Method 2. The study aimed to identify the most effective summarization technique through quantitative evaluation.

It was determined in the study that text lengths affect the performance of text summarization while summarizing. Accordingly, the similarity of Abstract to Conclusion drew attention in this study. Therefore, in this study, two methods were considered according to text lengths and their similarity ratios were determined. Accordingly, it is determined that method 2 gives better results in summarization.

The summaries generated by each algorithm were compared to the original full-text article summaries using various evaluation metrics, including ROUGE-N, ROUGE-L, BLEU, and METEOR, to assess overlapping n-grams, longest common sequences, and semantic similarity.

Table 2 shows the results of the similarity metrics mentioned above for each algorithm. The difference between the similarity metrics rises up to 43 percent. In

order to eliminate this problem, the study focuses on a single metric, which is the arithmetic mean of all metrics. As mentioned before, after the results of the two methods were determined, the average similarity ratios were determined by taking the arithmetic mean of the similarity metrics, which are given in Table 5.

As indicated in Table 2, a high difference between the metrics indicates that the arithmetic mean will give better results. The results of the metrics of the approaches are also shown in Table 3. In the table where the metric results are given for both methods, there is again a significant difference between the metrics. Therefore, the average results of the approaches are shown in Table 4 by taking the arithmetic mean of the metrics for the approaches.

In the light of the findings, results were obtained for both methods. When these results were analyzed, Content-Based approaches produced the best results when the arithmetic average of the metrics for method 1 in article summarization was taken. The similarity of the summary to the real summary was determined as the highest score here and was determined as 0.328. For Method 2, Content-Based approaches are again in the leading position with 0.343. Based on these results, we can say that Content-Based approaches are better than other approaches for inferential text summarization in scientific articles. We can see the results of all approaches in Table 4 below.

According to the results of Table 4, the Content-Based approach shows a higher success rate than the other methods. The fact that this approach has success rates of 0.328 and 0.343 under Method 1 and Method 2, respectively, shows that this approach is more effective than the others.

According to the results of Table 4, the difference between the best and worst performing approaches is quite significant. While the best result is obtained in the Content-Based approach, the worst result is obtained in the Pointer-Based approach, which has a success rate of only 0.155 under Method 1. The difference between these results is 173 percent, which shows a significant difference between the best and the worst results. This indicates that the Content-Based approach is superior to the others, and the Pointer-Based approach is less effective in the context of this particular problem.

It is conceivable that the LSA and Luhn algorithms within the Content Based approach could play a critical role in achieving this high success. How these algorithms work and what they take into account may require further investigation to explain this high success.

In addition, the algorithm that gives the best results over all the algorithms studied, regardless of the approaches, is determined for Method 1 and Method 2 and shown in Table 4. Taking the arithmetic mean of the metrics, the best algorithm for Method 1 was the LexRank algorithm with 0.349 accuracy, while the best algorithm for Method 2 was the User Driven Based with 0.361 accuracy. The results of all algorithms are shown in Table 5.

Table 2. Metric scores per algorithm.

Metric Scores Per Algorithm	Method 1				Method 2			
	BLEU	RougeN	RougeL	METEOR	BLEU	RougeN	RougeL	METEOR
LexRank	0.293	0.381	0.167	0.556	0.370	0.364	0.185	0.480
TextRank	0.179	0.382	0.141	0.609	0.335	0.362	0.172	0.499
LSA	0.236	0.369	0.143	0.531	0.350	0.356	0.174	0.476
Luhn	0.114	0.410	0.131	0.688	0.313	0.369	0.166	0.521
KL-Sum	0.248	0.330	0.143	0.496	0.365	0.332	0.165	0.443
SumBasic	0.364	0.256	0.129	0.293	0.387	0.315	0.158	0.399
Edmunson	0.189	0.376	0.147	0.597	0.340	0.376	0.187	0.511
Centroid Based	0.282	0.320	0.152	0.502	0.389	0.320	0.158	0.426
Frequency Based	0.439	0.227	0.132	0.258	0.474	0.322	0.185	0.426
MMR	0.315	0.325	0.156	0.465	0.366	0.257	0.130	0.372
Relevance Based	0.345	0.313	0.157	0.436	0.417	0.318	0.168	0.412
PointerGenerator	0.319	0.117	0.064	0.121	0.464	0.315	0.181	0.385
DivRank	0.359	0.284	0.146	0.384	0.433	0.312	0.172	0.382
Topical Pagerank	0.362	0.275	0.142	0.371	0.420	0.283	0.149	0.344
QueryBased	0.409	0.204	0.123	0.230	0.415	0.184	0.122	0.177
User-Driven	0.409	0.315	0.161	0.429	0.486	0.352	0.197	0.445

Table 3. Metric scores per approach.

Metric Scores Per Approach	Method 1				Method 2			
	BLEU	RougeN	RougeL	METEOR	BLEU	RougeN	RougeL	METEOR
Statistical	0.273	0.335	0.145	0.494	0.373	0.336	0.138	0.451
Graph-Based	0.298	0.331	0.149	0.480	0.390	0.330	0.170	0.426
Content-Based	0.175	0.390	0.137	0.610	0.332	0.363	0.170	0.499
Position-Based	0.323	0.288	0.141	0.398	0.388	0.318	0.158	0.413
Pointer-Based	0.319	0.117	0.064	0.121	0.464	0.315	0.181	0.385
User-Oriented	0.409	0.260	0.142	0.330	0.451	0.268	0.160	0.311

Table 4. Results of the approaches.

Approaches	Method 1	Method 2
Statistical	0,312	0,329
Content Based	0,328	0,343
Graph Based	0,314	0,327
Pointer Based	0,155	0,336
Position Based	0,288	0,316
User Oriented	0,285	0,293

Table 5. Results of the algorithms.

Algorithms	Method 1 results	Method 2 results
Lex_Rank	0,349	0,344
Text_Rank	0,328	0,339
LSA	0,319	0,339
Luhn	0,336	0,347
KL-Sum	0,304	0,323
Sum_Basic	0,261	0,314
Edmunson	0,327	0,349
Centroid_Based	0,314	0,318
Frequency-Based	0,264	0,347
MMR	0,314	0,274
Relevance-Based	0,312	0,323
DivRank	0,292	0,325

Topical PageRank	0,286	0,299
Pointer Generator	0,155	0,336
Query Based	0,241	0,225
User Driven Based	0,329	0,361

In the study, four metrics were determined for the results of the approaches, and algorithms and the arithmetic average of these metrics constituted our results. On the other hand, when the metric that gives the highest result is accepted instead of the arithmetic average of the metrics, the algorithm and approach change.

In this study, the arithmetic mean was used to evaluate 4 metrics. The aim was to provide a consistent and fair evaluation of the dataset by providing equal weighting for each metric.

The use of a weighted average produces different results for each metric, complicating the evaluation and undermining the reliability of the results. Our observations have shown that the use of weighted averages can distort the overall picture by overestimating or underestimating the importance of some metrics.

With the arithmetic mean, each metric had a 25 per cent share and all metrics affected the system equally. This

allowed us to make a clearer and more objective assessment of the dataset.

As a result, the use of the arithmetic mean created an equal and fair evaluation ground for the 4 metrics in our study. Avoiding the weighted average ensured a consistent and reliable analysis of the dataset.

When the arithmetic mean of the metrics and the metrics that produce the highest results are selected, we can see in Table 6 and Table 7 that although the Content-Based approach is the best approach as the arithmetic mean of the metrics, when we try the metric that produces the highest results, Statistical approaches produce the highest results for Method 1 and Method 2.

Table 6. Results of the average metrics and best scores metrics for method 1.

Average Results & Best Results for Method 1		
Approaches	Average Metric Result	Best Metric Result
Statistical	0,312	0,389
Content-Based	0,328	0,363
Graph-Based	0,314	0,371
Pointer-Based	0,155	0,155
Position-Based	0,288	0,327
User-Oriented	0,285	0,343

Table 7. Results of the average metrics and best scores metrics for method 2.

Average Results & Best Results for Method 2		
Approaches	Average Metric Result	Best Metric Result
Statistical	0,329	0,397
Content Based	0,343	0,358
Graph Based	0,327	0,366
Pointer Based	0,336	0,336
Position Based	0,316	0,338
User Oriented	0,293	0,373

In addition, the LDA algorithm was used for the keywords to be obtained at the end of the model as the output of the study, and the outputs achieved a success of 0.41 when compared with the keywords of the original text.

As a result, it seems that the best approach, according to different similarity metrics, is the Content-Based approach for extractive text summarization for scientific articles. In addition, it was determined that LexRank is the algorithm

that works best in the face of changing ratios as the size of the text increases.

Conclusion

This comprehensive benchmarking of extractive text summarization techniques on scientific documents provides data-driven insights to guide future research. The quantitative advantages of the different algorithms are described. This study provides a recommendation for future

research on scientific papers and theses. It will be useful for abstract and keyword extraction in the conversion and publication of theses into articles. Researchers can find more appropriate results by using Abstractive text summarization techniques.

The study's key findings and results can be summarized as follows:

1. Evaluation of Summarization Algorithms: The performance of each summarization algorithm was systematically evaluated using quantitative metrics. For each algorithm, summaries were generated using both the first and second summarization methods, and the results were compared.
2. Identification of the Best-Performing Algorithm: The algorithm that yielded the highest average evaluation scores across the four metrics (ROUGE-N, ROUGE-L, BLEU, METEOR) was considered the best-performing approach. Additionally, the algorithm with the highest individual score for each metric across all algorithms was noted.
3. Optimized Summaries: The top-performing algorithm was employed to generate optimized summaries for each article. These summaries were subjected to Latent Dirichlet Allocation (LDA) topic modeling to identify core themes and keywords.
4. Topic Modeling and Keyword Extraction: The topics and keywords extracted from the optimized summaries were manually reviewed and filtered to gain insights into the main themes and key terms covered in the articles.

In conclusion, this comprehensive benchmark evaluation shed light on the effectiveness of various summarization algorithms across a diverse range of articles. By averaging metric scores, the study identified the top-performing technique, which in turn generated optimized summaries. The subsequent topic modeling and keyword extraction processes provided valuable insights into the core themes and keywords within the articles, further emphasizing the importance of effective summarization techniques in text analysis and understanding.

References

- [1] W. S. El-Kassas, C. R. Salama, A. A. Rafea, and H. K. Mohamed, "Automatic text summarization: A comprehensive survey," *Expert Syst Appl*, vol. 165, p. 113679, 2021.
- [2] A. Dash, A. Shandilya, A. Biswas, K. Ghosh, S. Ghosh, and A. Chakraborty, "Summarizing user-generated textual content: Motivation and methods for fairness in algorithmic summaries," *Proc ACM Hum Comput Interact*, vol. 3, no. CSCW, pp. 1–28, 2019.
- [3] N. Alami, M. El Mallahi, H. Amakdouf, and H. Qjjidaa, "Hybrid method for text summarization based on statistical and semantic treatment," *Multimed Tools Appl*, vol. 80, pp. 19567–19600, 2021.
- [4] A. Kanapala, S. Pal, and R. Pamula, "Text summarization from legal documents: a survey," *Artif Intell Rev*, vol. 51, pp. 371–402, 2019.
- [5] S. Song, H. Huang, and T. Ruan, "Abstractive text summarization using LSTM-CNN based deep learning," *Multimed Tools Appl*, vol. 78, pp. 857–875, 2019.
- [6] T. Liu, "A Hybrid Automatic Text summarization Model for Judgment Documents".
- [7] D. Yadav, J. Desai, and A. K. Yadav, "Automatic text summarization methods: A comprehensive review," *arXiv preprint arXiv:2204.01849*, 2022.
- [8] G. Erkan and D. R. Radev, "Lexrank: Graph-based lexical centrality as salience in text summarization," *Journal of artificial intelligence research*, vol. 22, pp. 457–479, 2004.
- [9] R. Mihalcea and P. Tarau, "A language independent algorithm for single and multiple document summarization," in *Companion Volume to the Proceedings of Conference including Posters/Demos and tutorial abstracts*, 2005.
- [10] C. Mallick, A. K. Das, M. Dutta, A. K. Das, and A. Sarkar, "Graph-based text summarization using modified TextRank," in *Soft Computing in Data Analytics: Proceedings of International Conference on SCDA 2018*, Springer, 2019, pp. 137–146.
- [11] K. Kireyev, "Using Latent Semantic Analysis for Extractive Summarization.," in *TAC*, 2008.
- [12] K. Srividya, S. K. Bommuluri, V. V. V. K. Asapu, T. R. Illa, V. R. Basa, and R. V. S. Chatradi, "A Hybrid Approach for Automatic Text Summarization and Translation based On Luhn, Pegasus, and Textrank Algorithms," in *2022 International Conference on Smart Generation Computing, Communication and Networking (SMART GENCON)*, IEEE, 2022, pp. 1–8.
- [13] C. Fang, D. Mu, Z. Deng, and Z. Wu, "Word-sentence co-ranking for automatic extractive text summarization," *Expert Syst Appl*, vol. 72, pp. 189–195, 2017.
- [14] V. Gupta and G. S. Lehal, "A survey of text summarization extractive techniques," *Journal of emerging technologies in web intelligence*, vol. 2, no. 3, pp. 258–268, 2010.

- [15] A. Sinha, A. Yadav, and A. Gahlot, "Extractive text summarization using neural networks," *arXiv preprint arXiv:1802.10137*, 2018.
- [16] D. Miller, "Leveraging BERT for extractive text summarization on lectures," *arXiv preprint arXiv:1906.04165*, 2019.
- [17] J. Xu, Z. Gan, Y. Cheng, and J. Liu, "Discourse-aware neural extractive text summarization," *arXiv preprint arXiv:1910.14142*, 2019.
- [18] J. N. Madhuri and R. G. Kumar, "Extractive text summarization using sentence ranking," in *2019 international conference on data science and communication (IconDSC)*, IEEE, 2019, pp. 1–3.
- [19] R. Alguliev and R. Aliguliyev, "Evolutionary algorithm for extractive text summarization," *Intell Inf Manag*, vol. 1, no. 02, p. 128, 2009.
- [20] J. Xu and G. Durrett, "Neural extractive text summarization with syntactic compression," *arXiv preprint arXiv:1902.00863*, 2019.
- [21] N. S. Shirwandkar and S. Kulkarni, "Extractive text summarization using deep learning," in *2018 fourth international conference on computing communication control and automation (ICCUBEA)*, IEEE, 2018, pp. 1–5.
- [22] R. A. García-Hernández and Y. Ledeneva, "Single extractive text summarization based on a genetic algorithm," in *Pattern Recognition: 5th Mexican Conference, MCP R 2013, Querétaro, Mexico, June 26-29, 2013. Proceedings 5*, Springer, 2013, pp. 374–383.
- [23] Q. A. Al-Radaideh and D. Q. Bataineh, "A hybrid approach for arabic text summarization using domain knowledge and genetic algorithms," *Cognit Comput*, vol. 10, pp. 651–669, 2018.
- [24] R. C. Belwal, S. Rai, and A. Gupta, "A new graph-based extractive text summarization using keywords or topic modeling," *J Ambient Intell Humaniz Comput*, vol. 12, no. 10, pp. 8975–8990, 2021.
- [25] R. Rani and D. K. Lobiyal, "An extractive text summarization approach using tagged-LDA based topic modeling," *Multimed Tools Appl*, vol. 80, pp. 3275–3305, 2021.
- [26] J. He, W. Kryściński, B. McCann, N. Rajani, and C. Xiong, "Ctrlsum: Towards generic controllable text summarization," *arXiv preprint arXiv:2012.04281*, 2020.
- [27] M. Mohd, R. Jan, and M. Shah, "Text document summarization using word embedding," *Expert Syst Appl*, vol. 143, p. 112958, 2020.
- [28] D. Wang, P. Liu, M. Zhong, J. Fu, X. Qiu, and X. Huang, "Exploring domain shift in extractive text summarization," *arXiv preprint arXiv:1908.11664*, 2019.
- [29] M. Yousefi-Azar and L. Hamey, "Text summarization using unsupervised deep learning," *Expert Syst Appl*, vol. 68, pp. 93–105, 2017.
- [30] IEEE, "IEEE Xplore." Accessed: Oct. 12, 2023. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>
- [31] C. Kruengkrai and C. Jaruskulchai, "Generic text summarization using local and global properties of sentences," in *Proceedings IEEE/WIC International Conference on Web Intelligence (WI 2003)*, IEEE, 2003, pp. 201–206.
- [32] M. Moradi and N. Ghadiri, "Quantifying the informativeness for biomedical literature summarization: An itemset mining method," *Comput Methods Programs Biomed*, vol. 146, pp. 77–89, 2017.
- [33] Y. Ko and J. Seo, "An effective sentence-extraction technique using contextual information and statistical approaches for text summarization," *Pattern Recognit Lett*, vol. 29, no. 9, pp. 1366–1371, 2008.
- [34] C. Mallick, A. K. Das, M. Dutta, A. K. Das, and A. Sarkar, "Graph-based text summarization using modified TextRank," in *Soft Computing in Data Analytics: Proceedings of International Conference on SCDA 2018*, Springer, 2019, pp. 137–146.
- [35] R. C. Belwal, S. Rai, and A. Gupta, "A new graph-based extractive text summarization using keywords or topic modeling," *J Ambient Intell Humaniz Comput*, vol. 12, no. 10, pp. 8975–8990, 2021.
- [36] S. Beliga, A. Meštrović, and S. Martinčić-Ipšić, "An overview of graph-based keyword extraction methods and approaches," *Journal of information and organizational sciences*, vol. 39, no. 1, pp. 1–20, 2015.
- [37] O. Sornil and K. Gree-Ut, "An automatic text summarization approach using content-based and graph-based characteristics," in *2006 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems*, IEEE, 2006, pp. 1–6.

- [38] H. M. M. Hasan, F. Sanyal, and D. Chaki, "A novel approach to extract important keywords from documents applying latent semantic analysis," in *2018 10th International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST)*, IEEE, 2018, pp. 117–122.
- [39] S. Gholamrezazadeh, M. A. Salehi, and B. Gholamzadeh, "A comprehensive survey on text summarization systems," in *2009 2nd International Conference on Computer Science and its Applications*, IEEE, 2009, pp. 1–6.
- [40] A. S. Schwartz and M. A. Hearst, "A simple algorithm for identifying abbreviation definitions in biomedical text," in *Biocomputing 2003*, World Scientific, 2002, pp. 451–462.
- [41] A. Dash, A. Shandilya, A. Biswas, K. Ghosh, S. Ghosh, and A. Chakraborty, "Summarizing user-generated textual content: Motivation and methods for fairness in algorithmic summaries," *Proc ACM Hum Comput Interact*, vol. 3, no. CSCW, pp. 1–28, 2019.
- [42] N. Elhadad, M.-Y. Kan, J. L. Klavans, and K. R. McKeown, "Customization in a unified framework for summarizing medical literature," *Artif Intell Med*, vol. 33, no. 2, pp. 179–198, 2005.
- [43] M. Song, Y. Feng, and L. Jing, "HISum: Hyperbolic Interaction Model for Extractive Multi-Document Summarization," in *Proceedings of the ACM Web Conference 2023*, 2023, pp. 1427–1436.
- [44] D. Yadav, J. Desai, and A. K. Yadav, "Automatic text summarization methods: A comprehensive review," *arXiv preprint arXiv:2204.01849*, 2022.
- [45] S. Upasani, N. Amin, S. Damania, A. Jadhav, and A. M. Jagtap, "Automatic summary generation using textrank based extractive text summarization technique," 2020.
- [46] D. M. Victor, F. F. Eduardo, R. Biswas, E. Alegre, and L. Fernández-Robles, "Application of extractive text summarization algorithms to speech-to-text media," in *Hybrid Artificial Intelligent Systems: 14th International Conference, HAIS 2019, León, Spain, September 4–6, 2019, Proceedings 14*, Springer, 2019, pp. 540–550.
- [47] S. Sah, S. Kulhare, A. Gray, S. Venugopalan, E. Prud'Hommeaux, and R. Ptucha, "Semantic text summarization of long videos," in *2017 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, IEEE, 2017, pp. 989–997.
- [48] G. Rossiello, P. Basile, and G. Semeraro, "Centroid-based text summarization through compositionality of word embeddings," in *Proceedings of the multiling 2017 workshop on summarization and summary evaluation across source types and genres*, 2017, pp. 12–21.
- [49] A. Hajjar and J. Tekli, "Unsupervised extractive text summarization using frequency-based sentence clustering," in *European Conference on Advances in Databases and Information Systems*, Springer, 2022, pp. 245–255.
- [50] P. Verma and H. Om, "Extraction based text summarization methods on user's review data: A comparative study," in *Smart Trends in Information Technology and Computer Communications: First International Conference, SmartCom 2016, Jaipur, India, August 6–7, 2016, Revised Selected Papers 1*, Springer, 2016, pp. 346–354.
- [51] R. Hao, Y. Li, Y. Feng, and Z. Chen, "Are duplicates really harmful? An empirical study on bug report summarization techniques," *Journal of Software: Evolution and Process*, p. e2424, 2022.
- [52] A. Reunamo *et al.*, "Text Classification Model Explainability for Keyword Extraction—Towards Keyword-Based Summarization of Nursing Care Episodes," in *MEDINFO 2021: One World, One Health—Global Partnership for Digital Innovation*, IOS Press, 2022, pp. 632–636.
- [53] A. Kumar, S. Seth, S. Gupta, and S. Maini, "Sentic computing for aspect-based opinion summarization using multi-head attention with feature pooled pointer generator network," *Cognit Comput*, vol. 14, no. 1, pp. 130–148, 2022.
- [54] N. Rahman and B. Borah, "Improvement of query-based text summarization using word sense disambiguation," *Complex & Intelligent Systems*, vol. 6, pp. 75–85, 2020.
- [55] N. Gu and R. H. R. Hahnloser, "SciLit: A Platform for Joint Scientific Literature Discovery, Summarization and Citation Generation," *arXiv preprint arXiv:2306.03535*, 2023.
- [56] P. Gupta, S. Nigam, and R. Singh, "A Statistical Language Modeling Framework for Extractive Summarization of Text Documents," *SN Comput Sci*, vol. 4, no. 6, p. 750, 2023.
- [57] H. C. Manh, H. Le Thanh, and T. L. Minh, "Extractive Multi-document Summarization using

- K-means, Centroid-based Method, MMR, and Sentence Position,” in *Proceedings of the 10th International Symposium on Information and Communication Technology*, 2019, pp. 29–35.
- [58] R. Parimoo, R. Sharma, N. Gaur, N. Jain, and S. Bansal, “A review on text summarization techniques,” *Int J Res Appl Sci Eng Technol*, vol. 10, no. 5, pp. 871–873, 2022.
- [59] W. Xiao and G. Carenini, “Extractive summarization of long documents by combining global and local context,” *arXiv preprint arXiv:1909.08089*, 2019.
- [60] N. Giarelis, C. Mastrokostas, and N. Karacapilidis, “Abstractive vs. Extractive Summarization: An Experimental Review,” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 13, p. 7620, 2023.
- [61] A.-N. Dutulescu, M. Dascalu, and S. Ruseti, “Unsupervised Extractive Summarization with BERT,” in *2022 24th International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing (SYNASC)*, IEEE, 2022, pp. 158–164.



Gender, age, and ethnicity estimation by image processing

Mesut UYSAL^{1*}, Mehmet Fatih DEMİRAL²

¹ Burdur Mehmet Akif Ersoy University, Institute of Science, mesutt_4440@hotmail.com, Orcid No: 0009-0002-1650-8880

² Burdur Mehmet Akif Ersoy University, Faculty of Engineering and Architecture Department of Industrial Engineering, mfdemiral@mehmetakif.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-0742-0633

ARTICLE INFO

Article history:

Received 24 October 2023
Received in revised form 9
February 2024
Accepted 10 February 2024
Available online 29 March 2024

Keywords:

*CNN, image processing, python,
open CV, classification*

Doi: 10.24012/dumf.1380485

* Corresponding author

ABSTRACT

Today, with the increasing interest in technology, very useful studies are carried out in the field of image processing. Image technologies are also used in many fields such as security, defense, medicine, and industry. In this study, age, gender, and ethnicity were determined in the images by employing various deep-learning techniques and constructing a custom model using Convolutional Neural Networks (CNN). The dataset, consisting of 23,705 images obtained from the Kaggle dataset named "Face Data," was utilized for the analysis. The images were categorized based on gender, race, and age within the application, and the accuracy and losses of the results were visualized through graphs. Moreover, an interface was created using the Python Flask library, enabling real-time analysis of images captured from the camera to determine age, gender, and race. Among the 23,705 images, approximately 12,000 were male profiles and 11,000 were female profiles. These profiles were further classified into 5 distinct ethnicities as specified in the dataset. The ethnicities in the application were represented as follows: 0 for White, 1 for Black, 2 for Asian, 3 for Indian, and 4 for others. The most challenging aspect of this study is the variability of images due to factors such as posture, pose angle, brightness, and resolution at the time of shooting. Despite these challenges, the developed models showcased promising results, as evidenced by the accuracy metrics and visual representations provided in the study. The integration of real-time image analysis through the Python Flask interface enhances the practical applicability of the proposed techniques in various scenarios.

Introduction

Although people are by nature creatures prone to social interaction, various factors such as the environment, ethnicity, age, and gender influence their modes of interaction, speech patterns, sincerity, and communication dynamics.

Today, it is seen that the field of informatics is a rapidly developing field. Technologies such as blockchain, metaverse, and virtual printers are just a few of them. The image processing problem, which has been studied for a long time, can be summarized as follows:

It aims to make the image perceivable by computers and to benefit from the newly obtained image by processing it. Here, the input can be a video or a photograph, while the output is the section obtained from the image. To clarify the subject by giving an example through a human and a robot; A person driving a vehicle sends the data he receives by perceiving the traffic lights with his eyes to the brain and processes them there. If the light information sent is green, pass, if the information sent is red, stop, and the vehicle user acts according to the output is an example of this process. If the same problem is considered in the robot, the robot eye evaluates the data defined in the microprocessors defined by the received data and takes

action accordingly, which falls within the scope of image processing.

Image processing is the operations performed on matrices. A matrix is a two-dimensional array of numbers that represents the pixels in an image. When the pictures are examined, it can be understood that each frame consists of various colors. In image processing, each element of these matrices is called a pixel. Each element of the matrix corresponds to a single pixel in the image, and the value of the element represents the intensity or color of the pixel [1]. Image processing consists of pixel cells that form these matrices. Each pixel contains a numerical value between 0-255. In the context of this study, aims to enter the field of image processing, especially targeting gender, ethnicity, and age estimation. This endeavor capitalizes on the structural features of human beings and the transformative capabilities of artificial intelligence within the rapidly evolving landscape of the informatics world. In this study, the dataset employed in this study sourced from the 'Age, Gender, and Ethnicity Face Data' dataset on Kaggle [Nipun Arora, Kaggle] [2]. 23705 image sources taken from Kaggle were integrated into the project. The information in the data set is listed as a Data frame. The reason for this is that there is more than one data type and the information is made more understandable with data frame. According to the listed data, the average age of the people belonging to the images is 33, the

youngest individual is 1, and the oldest individual is 116 years old. The age range given is mostly concentrated in the 20-40 age range. When we look at the distribution of gender and ethnic values in the application, approximately 12000 people are male and 11000 people are female. Again, in terms of ethnic distinction, approximately 10,000 people are distributed as 0 (White), 4000 people 1 (Black), 3000 people 2 (Asian), 3800 people 3 (Indian), and 1800 people 4 (Other) ethnic origin. In the dataset, 18964 people were allocated for training and 4741 for testing.

Theoretical basis

The contemporary landscape of technological advancements has sparked a surge of interest in image processing, propelling numerous impactful studies. The application of image technologies extends across diverse sectors such as security, defense, medicine, and industry. Within this dynamic context, this study delves into the intricate realms of age, gender, and ethnicity prediction using various deep learning techniques, prominently featuring the development of a bespoke CNN model.

Deep learning in image processing

Deep Learning in Image Processing Deep learning, a subfield of machine learning, involves the utilization of artificial neural networks to enable the learning of intricate patterns and representations. In the context of image processing, deep learning techniques, particularly Convolutional Neural Networks (CNN), have demonstrated remarkable efficacy in tasks such as feature extraction and pattern recognition [3].

CNN model setup for age prediction

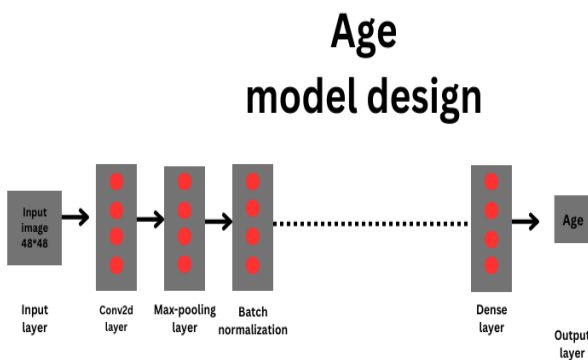


Figure 1. Age model design.

To accomplish deep learning, the integration of 4 CNN access neural networks into the model is performed respectively. These are four neural networks with 64, 128, 256, and 512 filters respectively. The first layer has (48, 48) input shape and the Relu activation function is used. In the second layer (3, 3) kernel size is defined. The third layer has a kernel size of (3, 3), and the same activation function is used. In the fourth layer, we again have a matrix dimension of (3, 3) and we set up the Relu activation function. The model also has a pool sizing layer. This model has 3 maximum pooling layers with pool size (2, 2). We also construct a model with a dropout layer with a ratio of 0.3 and 0.5 respectively. Finally, 2 dense layers with 128 and 1 neuron are added respectively. In the first dense layer, the Relu function is used, while in the second dense layer, no activation

function is used since there is a regression problem. As a result, in this model, a convolutional neural network with 6 convolutions, 4 maximum layers, 4 batch normalization, 4 dropout layers, and 2 dense layers was constructed. In addition, there are 2,553,729 parameters in the model, of which 2,551,809 are trainable and 1920 are untrainable.

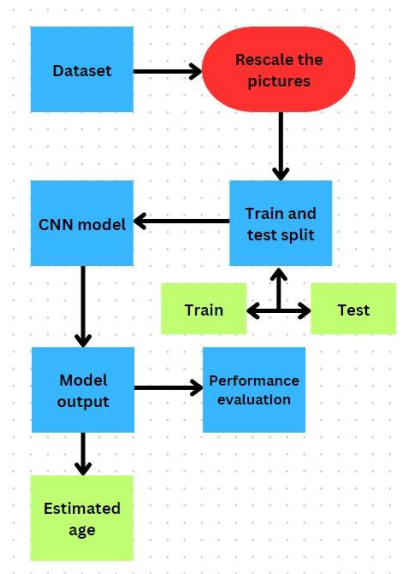


Figure 2. System architecture of the age model.

CNN model setup for gender prediction

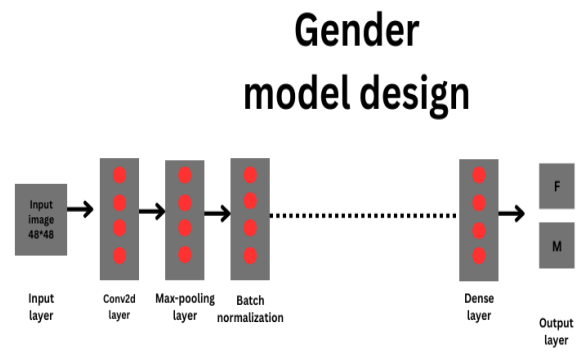


Figure 3. Gender model design.

For gender prediction, 20% of the data is allocated for testing and 80% for training. Random state 42 was chosen so that the data could be mixed and repeat more than one function call. As we created in the grief model, firstly the dimensions in the conv2D layer 48x48x1 and core images are defined. 'Relu' was used as an activation function. In the MaxPooling2D layer, the dimensions are reduced and the pool size is defined as (2, 2). In this way, the size of the attribute maps can be halved and the computational cost can be reduced. The normalization layer normalizes the mean and standard deviation of the attribute maps. Thus, the model runs faster. In the Dropout layer, it randomly resets 40% of the attribute maps by setting the value as 0.4 and prevents overfitting. In the flattened layer, multidimensional arrays help the model to learn faster and

better. In the Dense layer, we use sigmoid as the activation function, which relates each unit we give as input to each other as output. If the function is below 0.5, it gives 0, if it is above 0.5, it gives 1 result. In summary, this model is a neural network with 6 access layers, 3 maximum pooling, 3 normalization, and 2 dense layers. In total, in the model, there are 1,109,121 parameters, of which 1,108,225 are trained and 896 are untrained.

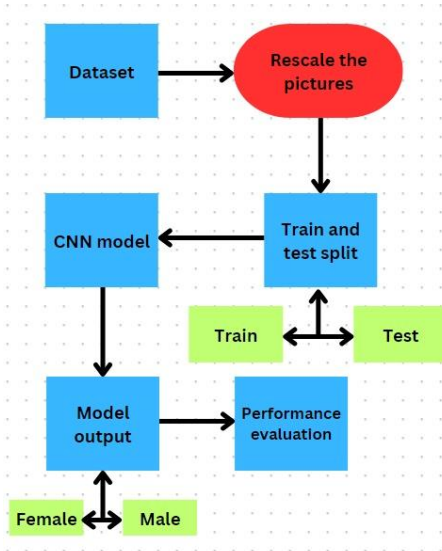


Figure 4. The system architecture of the gender model.

CNN model setup for ethnicity prediction

Ethnicity model design

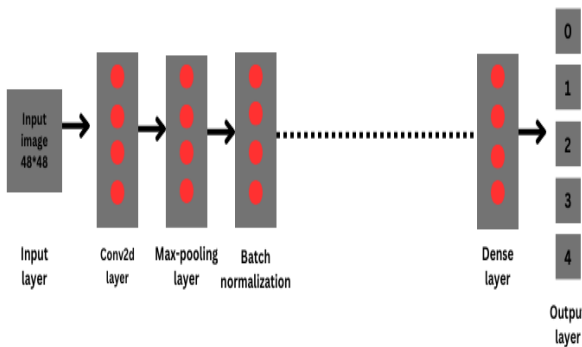


Figure 5. Ethnicity model design.

For ethnicity estimation, 20% of the data is allocated for testing and 80% for training. For the random state, the desired value can be given, but the value of 42 was chosen. Conv2D layer applies a 2D convolution layer on the input image using 64 filters of 3x3 size and RELU activation function. This layer is used to convolve the image features by sliding a filter over it. In the pooling layer, a 2x2 filter is selected to extract the feature map. Thanks to this layer, the number of parameters is reduced to prevent overfitting. In the Batch Normalization layer, the images are normalized to improve the performance of the

model. After this stage, a conv2D layer with a 3x3 size with 128 filters and RELU activation is applied to the output of the previous layer with a 2D convolution process. With this layer, more features are extracted from the image by applying more filters. In the dropout layer, the data is randomly distributed with a probability of 40% by giving a rate of 0.4 and overfitting is prevented. In the smoothing layer, the data is reduced to one dimension and prepared as input for dense layers. The dense layer is a dense layer that applies a fully connected process using 5 units and a sigmoid activation function over the input vector. Here, each of the 5 classes (white, black, Asian, Indian, and others) gives us a probability output.

This model has a total of 1.109.381 parameters, of which 1.108.485 are trainable and 896 are non-trainable. The accuracy loss for ethnicity was found to be 0.7979, which is not a bad rate, but it is open to improvement.

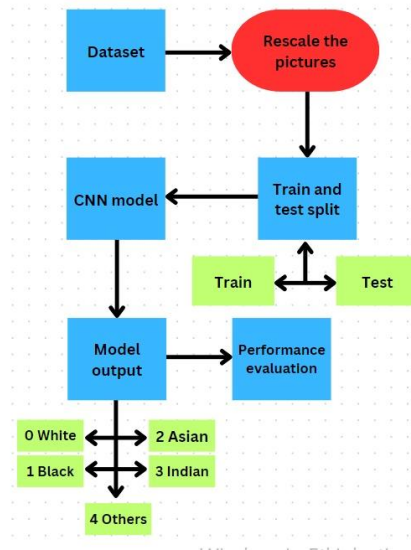


Figure 6. The system architecture of the ethnicity model.

Library, methods, and algorithms used

OpenCV

It is an open-source library that supports applications such as machine learning, image processing, and data analysis. It is used by many software languages such as Java, C++, Python, and MATLAB.

With the increase in R&D studies, the concept of computerized vision is gaining importance. With computer vision, we can understand and interpret images. For example, when uploading and labeling images on Facebook, the people who will be labeled come as a frame, and face detection algorithms are embedded in Facebook. In this way, faces in the picture can be found. Again, interpreting the state and movement images of someone who makes suspicious movements in terminals or crowded places and reporting them to security units, again taking into account the facial expression of the audience in the cinema and improving the films, computer vision is becoming valuable in parallel open cv. In this study, all codes are written in Python language. The OpenCV library contains hundreds of functions that support the capture, analysis, and manipulation of visual information connected to a computer by webcams, video files, and other types of devices. While simple functions

can be used to draw a line on a screen, more advanced parts of the library can include algorithms to detect faces, track motion and analyze shapes. In this application, OpenCV was used to import and resize images.

Pandas

One of the most important libraries used in data-related processing is Pandas. It is used in stages such as integrating the data set, reading, and processing the data. To install pandas on our computer, the "pip install pandas" command can be written from cmd. However, since Anaconda is used in this project, libraries such as NumPy, matplotlib, and skit-learn will be installed. This library was used in data processing by importing it into the project. Pandas are divided into 2 series and data frames. While a series consists of a single column; a data frame consists of multiple columns. In addition, the data frame contains more than one different data type such as int, string, bool is also an advantage for us. Since each of the values of age, gender, image name, and pixel values are of different types in the data set, the data set is defined in the data frame type.

	age	ethnicity	gender		img_name	pixels
0	1	2	0	20161219203650636.jpg	chip.jpg	129 128 128 126 127 130 133 135 139 142 145 14...
1	1	2	0	20161219222752047.jpg	chip.jpg	164 74 111 168 169 171 175 182 184 188 193 199...
2	1	2	0	20161219222832191.jpg	chip.jpg	67 70 71 70 69 67 70 79 90 103 116 132 145 155...
3	1	2	0	20161220144911423.jpg	chip.jpg	193 197 198 200 199 200 202 203 204 205 208 21...
4	1	2	0	20161220144914327.jpg	chip.jpg	202 205 209 210 209 209 210 211 212 214 218 21...

Figure 7. Information about the individuals in the data.

In Figure 7, the age, ethnicity, gender, image name, and pixel values of the first 5 people in the data set are given as Data frames. In projects with large data sets, such operations are performed to see the data.

	count	mean	std	min	25%	50%	75%	max
age	23705.0	33.300907	19.885708	1.0	23.0	29.0	45.0	116.0
ethnicity	23705.0	1.269226	1.345638	0.0	0.0	1.0	2.0	4.0
gender	23705.0	0.477283	0.499494	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0

Figure 8. Structural content of the data set.

Figure 8 shows the structure of the dataset with the describe command to recognize the content of the data. In the dataset; there are 23705 people, the average age value is 33,300, and the standard deviation is 19,88.

Seaborn

The Seaborn library is built like the Matplotlib library and is used for data visualization. Visualizing data is extremely important. To understand, interpret, and draw conclusions from large data sets, we need to have objective visible values in front of us. Visualizing the data is known as expressing the data with a graph or line [4]. In the project, the distribution of the age variable is expressed by the plot method.

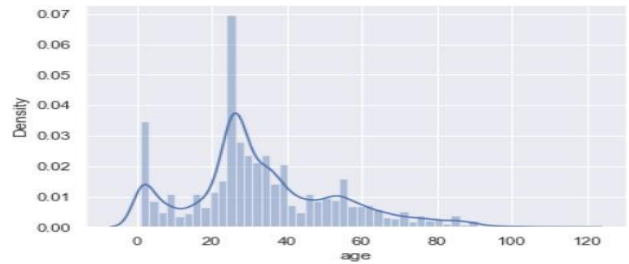


Figure 9. Age distribution of individuals in the data set.

According to Figure 9, it is seen that the people in the data set are predominantly between the ages of 20-40.

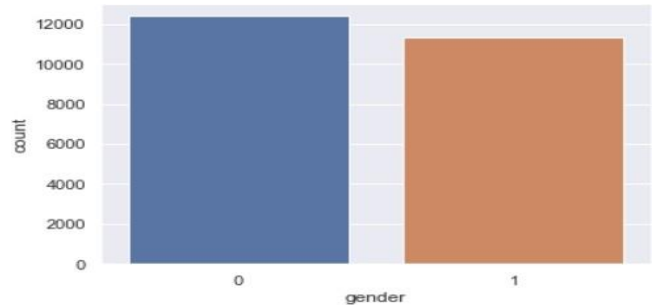


Figure 10. Gender distribution of individuals in the data set.

In Figure 10, the attributes of the gender variable are visualized with the count plot method. There are approximately 12 thousand men and 11 thousand women in the project.

NumPy

NumPy is a Python library that allows to work with matrix and array operations in mathematical operations. It is one of the most preferred libraries by data scientists. NumPy has a fixed size when creating arrays. But Python is an array whose size can change when creating arrays [5]. In the code, the pixel stack is transformed into a NumPy array, where the images are structured as 48x48.

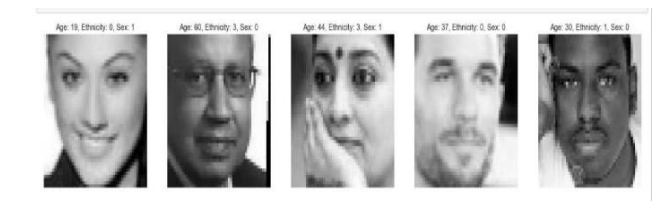


Image 1. Display of age, gender, and ethnicity values of the pictures in the data set.

As shown in Image 1, 5 pictures with a size of 20x10 were randomly drawn. The age, ethnicity, and gender of the people are shown in the picture. In the code, the pictures were sized 48x48 and entered into the CNN model. Then, since the pixel values of each image are between 0 and 255, the normalization process was performed by dividing the pixel value by 255 and compressing all values between 0 and 1. The normalization process provides better and faster training when training the model. Using the Batch hyperparameter, it is specified how many times it is processed.

Scikit-learn

The scikit learn library is one of the most basic libraries used in machine learning problems. Scikit-learn includes pre-implemented algorithms and metrics for a range of machine learning tasks such as classification and regression. This library enables data scientists and researchers to quickly apply various machine learning models and assess their performance efficiently.

This library was used to train-test the dataset and to measure the performance of the regression model for age. Of the data set used, 80% was used for training and 20% was used as test data.

Classification metrics

The process of obtaining a model using a method based on training data and using this model in prediction is called classification. In other words, classification is the process of predicting new incoming data with the experience gained from existing data. Features and result information about these features are kept in the training data. Categorical information is produced as a result of the result information and the prediction made. There are many methods in the literature. In these articles, preliminary information about the basic methods will be given [6].

Accuracy: The number of correct predictions / Number of all predictions is found by the formula. The overall performance of the model is found.

The accuracy value of our model: is 90.66.

Precision: It deals with how many predictions are correct.

This one as formulated is. $\text{True Positive} / \text{True Positive} + \text{False}$ the precision value of our Positive Model;

Sensitivity= 0.91.

Recall (sensitivity): $\text{True Positive} / \text{True Positive} + \text{False Positive}$.

Recall values in this model; Sensitivity=0.91.

F1 score: The F1 score is used to balance precision and recall. It is formulated as $F1 = 2 \times \text{precision} \times \text{recall} / \text{precision} + \text{recall}$. The f1 score value of our model: is 0.91 [7].

Confusion matrix

The confusion matrix is the agreement table showing the agreement between the actual labels and the prediction of the model. In this matrix, the row contains the number of predicted positive and negative values, while the column contains the actual positive and negative values.

Figure 11 shows a confusion matrix showing the performance of the test set with ethnicity data.

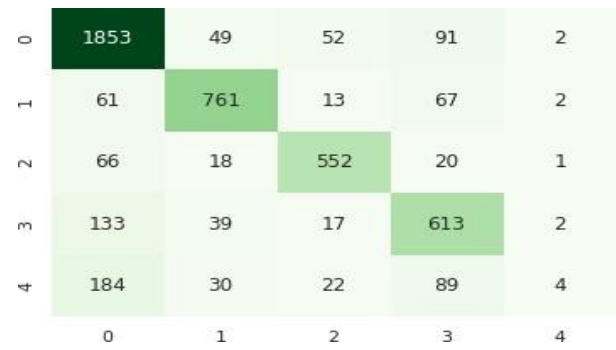


Figure 11. Performance results of test set with confusion matrix for ethnicity data.

- The ethnicity in the (0,0) position (first row) is generally well-predicted, as evidenced by the high value.
- The ethnicity in the (1,1) position (second row) also has good prediction results, with the highest value.
- The ethnicity in the (2,2) position (third row) is reasonably well-predicted, as shown by the high value.
- The ethnicity in the (3,3) position (fourth row) demonstrates a decent prediction, with the highest value.
- The ethnicity in the (4,4) position (fifth row) faces challenges, especially indicated by the relatively lower values.

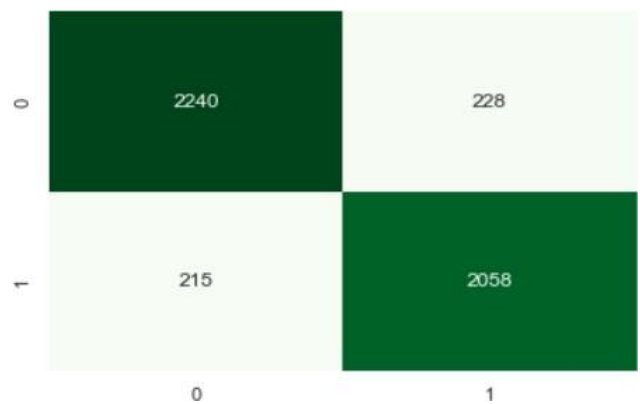


Figure 12. Performance results of test set with confusion matrix for gender data.

In Figure 12, there are 4741 data reserved for the test data in the confusion matrix. The predictions are as follows:

- True positives: 2240
- False positives: 228
- True negatives: 2058
- False negatives: 215

If the confusion matrix metric is interpreted here, the model predicts 2240 data as male and knows 2240 data correctly. However, it made a wrong prediction by predicting 215 data as female. In the same way, it predicted 2058 data as 1 (female)

and made the correct prediction. However, for 228 data, it is predicted as 0 (male).

Regression metrics

MAE (Mean Absolute Error): It is one of the regression metrics. It is referred to as mean absolute error. It is a more direct representation of the sum of the error terms by taking the sum of the absolute error values. The MAE of our model is approx. MAE 5.896764. This means that the error rate of our age regression model is approximately this value. The model can calculate the age of a person who is 65 as 60 or 70 and give us the result as a result.

Errors Graph: The graph shows the visual result of the errors graph of the model. According to the graph, errors can be seen. If it were a straight line, it would be assumed to be an error-free model. This graph expresses the relationship between the actual value and the predicted values. The width of the graph is 8 inches and the height is 6 inches. Some scatter points on the graph indicate error values (Figure 13).

Mean Square Error (MSE) is a measure used to represent regression models. It gives an absolute number of how much the predicted results differ from the actual values. In other words, it measures how close the model's predictions are to the real values.

A lower MSE value indicates better model performance. The MSE value of the Age model was obtained as 68.92.

Root Mean Square Error (RMSE): It gives an absolute number of how much the predicted results differ from the actual values. That is, it measures how close the model's predictions are to the true values.

RMSE is the square root of MSE (Mean Square Error). MSE is the mean value of the squared error. The error of the prediction is squared, these squares are taken and the result is a number.

A lower RMSE indicates a better model demonstration

The RMSE value of the Age model was found to be 8.302.

R² (Coefficient of Determination): is how close a part is to the recorded regression line.

R² indicates how well the model's predictions fit the observed pattern. The highest value can be 1. The closer R² is to 1 for the data set, the higher the performance of the model on the data. R² value in the age model was calculated as 0.821.

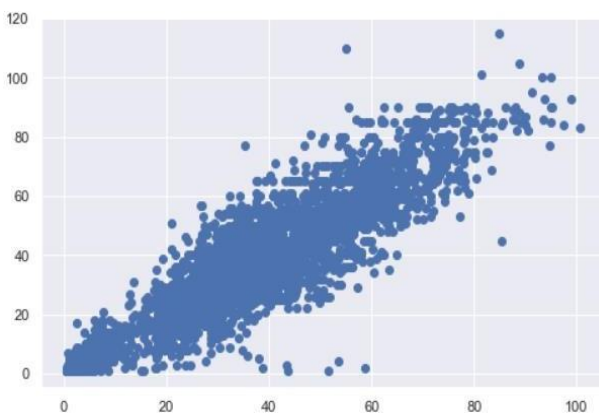


Figure 13. Errors graph of the model.

Keras

Keras library is a machine learning library that can work on tensor flow used for deep learning and is used in this project. Since deep learning techniques are used in practice;

- Defining training data,
- Layer and model formation,
- This library provides services such as epoch generation and optimization, definition of hyperparameters, etc. using for.

Keras has many usage advantages;

The created model can run smoothly on the CPU and also supports this structure when CNN models are preferred. For the age model in the application, the layers to be added are first defined. In the first hidden layer, a filter with 64 neurons and a 3x3 size is defined. The defined neuron may vary depending on the size of the application. Networks that usually start with 32 or 64 neurons can also be defined as 256, 512, or 1024 if there is a very complex dataset. Filter values should be increased gradually from smallest to largest. The structure specified as the kernel size is known as the kernel size of the cov2d parameter. The specified heap size can be (1,1) (3,3) (5,5) and (7,7). If the input images are large, such as 128x128, a kernel size greater than 3 can be chosen to aid learning. Since the images are 48x48 in size, a 3x3 kernel size was chosen. Layers of the CNN model were used here.

Firstly, the convolutional layer (CNN) layer is used to detect images whose data set is image and video. In this layer, the features of the image are taken and the feature table is created by multiplying the filter values and pixel values of the image. While we could define 2 parameters for the cov2D class in the convolutional layer, the value "same" was assigned to the padding value of the output volume to match the input size volume and maintain its size. The Max Pooling layer, used as an intermediate layer, is used to reduce the size of the image. The Max Pooling layer is a section of the pool layer in the Max Pooling layer. It is used to prevent loss of value from the image. Normalization operations are performed in the created layer and the values obtained are compressed between 0 and 1. In the flattened layer, the image is flattened and decomposed as a single vector. It is necessary to create as many layers as the output to be obtained.

When using artificial neural networks in the defined layers, activation functions are used. Because these functions are useful in expressing how neurons change. Generally, non-linear activation functions are preferred. This is because they increase the complexity of the model and encourage better model learning. These functions compress the output within a certain range. Relu function is used. In Relu, values less than zero take the value 0, and values greater than 0 take the value they are in. The value of Relu is already from 0 to plus infinity. The reason for choosing the "Adam" parameter from the optimizer function during the compilation phase after layers are created in the model is to control the learning, and generally, the "Adam" parameter provides a good optimization. Again, the "accuracy" metric can be used to see how the model will perform during training and to see the loss value.

Another important problem encountered in training artificial neural networks is Early Stopping. This event is briefly defined

as the process of memorizing the model and repeating itself continuously. This is caused by the increasing difference between the test validation and the loss value of the train. The defined callbacks parameter allows monitoring and triggering the performance and stopping the training process according to the situation. "Monitor" allows the training terminator to be measured according to the performance to be monitored. The behavior of the metric can be determined with the mode argument. It was stated that there is a tendency to increase by selecting max. In this way, if the verbose value is selected as 1, instantly updated results can be seen in the application.

Python flask

Flask is a framework used to create web services in Python language. It is a framework that can be learned quickly and has high performance. To install Flask, we install it with the pip install flask command in the terminal command of our project. We make use of the flask library as follows for the establishment of the camera connection and reading the image from the camera.

First of all, the flask library is integrated into the project for the process of creating a web interface by taking images, the function we write called video-stream generates the received images as bytes, and the received image frames are read and encoded in JPEG format. The byte stream is then responded to as an HTTP with the content type set to image/jpeg.

Framing and image framing in the flask library

The image retrieval process starts by sending a post request to HTTP. The received image is resized to 48x48 pixels by cropping only the pixels between 60-470 rows and 150-500 columns. Each pixel value in the image is divided by 255 and the normalization process is performed. And reshaping is done by making it 4-dimensional. After the frame editing process is finished, we transfer the 3 models we have previously trained to predict the age, gender, and ethnicity of the person to our application and perform the prediction operation for each model. For example, to predict gender, we need to integrate the previously trained gender. model5 model into the system, then the uploaded image is compared with the images in the trained model and sends us a prediction result between 0-1. Here 0 means male and 1 means female. If the prediction value is less than 0.5, the process of finding gender is performed by assigning it to the male group, otherwise to the female group. When we do the same process in age prediction, the person to be predicted is given to the previously trained age model. The results are stored in the age variable we define in the code. Since the age parameter is a numeric value, the output value is rounded to the nearest integer with the help of the round function in Python in order not to obtain a fractional number. (For example, when the age value of the person is 56,59, the output will give us the value 57).

Other parameters used

Epochs: Determines how many times the training data will be given to the model. In this code, 15 epochs are specified, which means the model will see each image 15 times.

Batch_size: Determines how many images the model will process in each step. In this code, batch size is set to = 64. At each step, the model will take 64 images and their losses and gradients will be calculated.

Verbose: Determines whether the model will show a message during its run. It can take values of 0,1 or 2. In this code, when verbose = 1 is defined in this code, a progress bar and loss metrics will be seen at the end of each epoch.

Literature review on image processing

The literature aims to investigate age, ethnicity, and gender determination according to facial features in our country and the world based on image processing-based machine learning techniques. Furthermore, by following the data of the person, mourning can be determined according to height, weight, and facial features. Dealing with CNN models involves handling more irregular data compared to traditional machine learning methods.

Uçar conducted a study on distraction, focusing on angular changes in head movements within a classroom environment. The study, which was carried out with C++ software, utilized the libraries required in image processing such as Python Open Cv. In the classroom, the student's face and facial expressions are recorded every 5 seconds, and a training set is created. Students' head structures are recorded and stored in 3 dimensions. It is determined that the students who are in the direction of the teacher are more attentive. Throughout the study, the UPNA database was used for the face recognition of the students. Each of the available data was divided into 2 classes (careful, and inattentive) by 5 different people. The datasets were tested with different algorithms and the highest performance was obtained with the SVM algorithm [8].

Günay and Nabiyevev estimated age using facial data, employing the LBP histogram. The LBP data, segmented by an attributive vector, underwent classification using methods like K-NN and minimum distance. Euclidean distances were calculated for all samples. The best experimental performance was calculated at 89% [9].

Ayata and Çavuş addressed the issue of person recognition and differentiation in images for security and criminology purposes. This study is based on artificial neural networks, a sub-branch of machine learning. Support vector machines and DSA methods were used to process all the data in the FEI dataset, Celeb A dataset, and Family dataset. The study achieved success rates ranging from 95% to 99%. For robust face recognition, artificial neural network-based classification was favored [10].

Eldem et al. conducted scientific research in the field of image processing with a study on the facial features of the person in the scientific field of image processing and the extent to which it resembles other individuals. The images processed in this study were obtained from cameras and external image recording devices. The images were digitized using the OpenCV library, known for its compatibility with C, C++, and Python and its versatility on platforms such as Android and Linux. Cameras were set at a distance of approximately 55-60 cm during data acquisition, and the dataset included information such as the person's name, surname, and a given ID [11].

In the studies of Gündüz and Cedimoğlu, the aim was to predict the gender of individuals using deep learning algorithms, regardless of age. Approximately 10% of the 6508 data were allocated for testing, while 90% were used for training. Gender

prediction was accomplished through data augmentation with a deep learning network. The study utilized Python programming language, Ubuntu, and Linux operating systems. CNN was employed, with Keras and Tensor flow libraries. VGG-16 achieved the best performance among the models used [12].

Kaya alp and Metlek predicted the gender of the person by taking 63228 images from the wiki database. A support vector machine was used in this application. Attention was given to creating a hyperplane, ensuring that the features of the classes consisted of the two most distant lines. In deep learning, speed plays a crucial role as it concurrently executes image recognition and classification processes. While CUDA is commonly employed in such projects based on the power of the computer graphics card, this study utilized MATLAB-based MatConvNet-1.0-beta15. At the point of success, it was classified according to SVM, and 80% of it was divided into training and 20% as tests. According to the results of the complexity matrix, the accuracy rate of the developed system is 94.48% [13].

In the scientific research of Toprak, the problem of age estimation with image processing techniques was addressed. LBP and HOGC histogram methods were used throughout the study. The data were classified according to the K-NN algorithm. When conducting such studies, models typically consider examples such as Anthropometric, Active, Appearance, Leaning Pattern, and Mourning Manifold. For instance, estimating the age range is treated as a classification problem, while precise age estimation is considered a regression problem. The IMDB-WIKI model was used for the database, consisting of 523051 images divided into a 90% training set and a 10% test set. For the performance of the system, mean absolute error (MAE), one of the error measurement techniques, was used [14].

Literature review: comparative analysis of deep learning approaches in image analysis studies

Table 1. Literature review comparison.

Features	Gender, Age, and Ethnicity Estimation by Image Processing	Recognition Of Students in The Classroom Environment and Detection of Distractions with Real-Time Image Processing [3].	Investigating The Effects of Facial Regions on Age Estimation [4].	Face Detection System Development with Image Processing Techniques [6].	Gender Estimation with Image by Using Deep Learning Algorithms [7].
Focus	Age, gender, race prediction	Age, gender, and race prediction	Age estimation based on facial regions	Image Processing Application	Gender Prediction
Model Type	CNN	CNN	LPQ and regional analysis	OpenCV and OpenCV Sharp	Alex Net and VGG-16

Dataset	A dataset comprising data from approximately 23,000 individuals.	UPNA Head Pose Database	FGNE T and PAL Databases	An original dataset was curated specifically for this study, consisting of images captured through a computer camera.	A dataset generated from Wikipedia images
Performance Analysis	Emphasized performance differences in age and gender predictions	Highlighted lower performance in the genetic class compared to the gender class	Found eye region to be more effective in age prediction than other regions	Achieved 79% success in face recognition application	Mentioned 99.41% success of VGG-16 in gender prediction
Future Recommendations	Suggested increasing the number of training iterations, adding more filters and layers, and working with higher-resolution photos	Recommended adding more features (eye direction, emotional state, etc.), conducting in-class tests with professional cameras, and expanding the dataset for attention distribution	Proposed working on determining regional weights in addition to regional analysis for better prediction accuracy	Recommended enhancing the success and performance of the developed OpenCV-based application by adding new features and training with more extensive datasets	Suggested experimenting with data diversity, data augmentation, minibatch augmentation, optimizer differentiation, and layer augmentation for better results.

Contributions to the literature

This study makes significant contributions to the application of deep learning techniques in predicting age, gender, and race from images and videos, addressing gaps in the existing literature and enhancing current knowledge:

In-depth analysis in multi-class prediction: Particularly in scenarios where the genetic class is subdivided into five subclasses, the study provides a detailed analysis of the performance of age, ethnicity, and gender prediction models, offering a valuable perspective to the literature. Emphasizing the challenges of class imbalance and multi-class scenarios can guide future similar studies.

Challenges and solutions in real-time applications: The study thoroughly explains the challenges associated with capturing real-time images from web cameras and details the solutions developed to overcome these challenges. This can serve as a

crucial reference for the development of similar applications or the enhancement of existing ones.

Recommendations for future research: By providing suggestions on how the study can be further improved through future training with higher-resolution images and the utilization of additional filters and layers in convolutional neural networks, the research offers a guiding framework for researchers and practitioners.

Ethnic diversity and deep learning: While most deep learning-based studies predominantly focus on gender and age, there is a pressing need for more research addressing ethnic diversity. This would enable a more effective evaluation of model performance across a broad demographic spectrum.

These contributions provide a valuable perspective on image analytics based on deep learning, filling gaps in the literature and inspiring future research endeavors.

Results and outputs

Printouts of the image received in the web environment

The photo in the picture belongs to me and I am 26 years old as of the date of uploading the photo (Image 2). The format of the photo is jpeg.



Image 2. Reshaped photograph.

When the image is uploaded to the application and reshaped, age, gender, and genetic prediction values are given as output in Figure 11.

```
In [6]: ethincyt[0]
Out[6]: 1

In [7]: gender[0]
Out[7]: 'Erkek'

In [8]: age[0][0]
Out[8]: 26.563057
```

Figure 11. Age, gender, and ethnicity prediction values of the picture.

While estimating age and gender in the photograph, the regression method was used for age, and the classification method was used for gender. The photographs in the data set are in pixel form. Since the pictures are 48x48 in size, they are in grey (black and white) form. The small size of the image makes the training easier and facilitates our work in training the model.

Performance results of the ethnicity model

Table 2 shows the results of the test set of the ethnicity class. For each class, 4 metrics are given. Precision is the rate at which that model predicts that class correctly. Recall shows how many of the images belonging to that class are correctly predicted.

F1-score, precision, and recall show how many of the images belonging to that class are correctly predicted. According to this model, the best performance of the model is 0 (0.85 f1-score) and the worst performance is 4. (0.04 f1-score.) The overall accuracy of the model is 0.80.

Table 2. Performance results of the ethnicity class of the model.

	Precision	Recall	F1-score	Support
0	0.82	0.89	0.85	2047
1	0.83	0.84	0.83	904
2	0.84	0.86	0.85	657
3	0.69	0.78	0.74	804
4	0.70	0.02	0.04	329
Accuracy			0.80	4741
Macro avg	0.78	0.68	0.66	4741
Weighted avg	0.79	0.80	0.77	4741

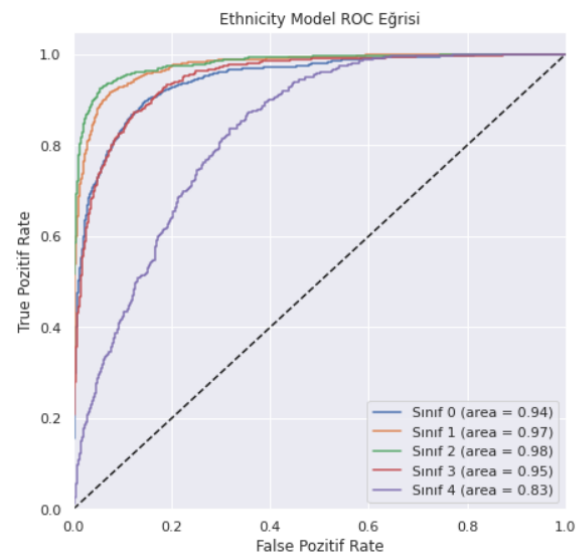


Figure 14. Ethnicity model roc curve.

Looking at the metrics of the model, we can say that it generally performs well. However, we see that some classes perform lower than others.

Precision, recall, f1-score values for classes 0, 1, and 2 are quite high. This indicates that our model is capable of predicting these classes accurately.

Precision and recall values for Class 3 are slightly lower but still acceptable. However, for this class, your model's performance is slightly lower than other classes.

Although the precision value for Class 4 is at an acceptable level, the recall and f1-score values are very low. This indicates that your model's ability to accurately predict this class is quite low. This means that our model often predicts this class.

The overall accuracy value is 80%. This means your model made 80% of all predictions correctly.

Performance results of the gender model

According to the data given in Table 3, a 91% accuracy value was obtained for both classes according to the gender model.

Table 3. Performance results of the gender model.

	Precision	Recall	F1-score	Support
0	0.92	0.90	0.91	2468
1	0.90	0.91	0.90	2273
Accuracy			0.91	4741
Macro avg	0.91	0.91	0.91	4741
Weighted avg	0.91	0.91	0.91	4741

Sensitivity: We see that the model has a precision of 92% for class 0 and 90% for class 1. This shows that most of the positive prediction examples provided by the model are positive.

Recall (Sensitivity): We see that the model has a sensitivity of 90% for class 0 and 91% for class 1. This shows that most of the true positive instances of your model are correctly detected.

F1-Score: The F1 score is a harmonic storage of precision and improvement and indicates that your model has an overall balanced performance. We see that your model has an F1 score of around 91% for both classes.

Accuracy (Accuracy): Your model is 91% overall. This shows that your model made 91% of all its predictions correctly.

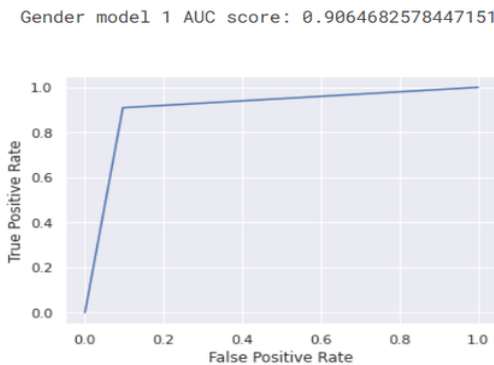


Figure 15. Gender model roc curve.

Figure 15 shows a curve named “Gender Model 1”. The model's AUC (Area Under the Curve) score was calculated to be approximately 0.906. The blue line on the chart represents ROC curves. This curve initially rises quickly and then flattens out, indicating that the model is performing well. The X-Axis is labeled “False Positive Rate” and has a value between 0 and 1. The Y axis is labeled “True Positive Rate” and again takes a value between 0 and 1.

Performance results of the age model

Table 4. Result of the age model.

	MAE	MSE	RMSE	R2 Score
Age Model Metrics	5.892996	68.927456	8.302256	0.821662

Mean Absolute Error (Mean Absolute Error): This metric measures how much your model's predictions deviate from the true values. The average mean Absolute Error of your model is approximately 5.89. This shows that your model's predictions differ from the actual values by 5.89 units on average.

Mean Square Error (Mean Square Error): This metric measures how much your model's predictions deviate from the actual values, taking the squared errors. However, it causes major mistakes to be punished more. The average speed Square Error of your model is approximately 68.93.

Square Root Mean Square Error (Square Root Mean Square Error): This metric takes the square root of the distance Square Error and measures how much your model's predictions deviate from the actual values. The average speed of your model is approximately 8.30 Square Root of Square Error.

R2 Score (R Squared Score): This metric measures how much better your model's predictions are than predictions made using the mean of the target variable. Your model's R Square Score is 0.82, indicating that your model explains 82% of its variance. This shows that your model is pretty good.

As a result, the overall performance of your model is quite good.

Conclusion

In conclusion, this study applied deep learning techniques to predict age, gender, and race from images and videos. Utilizing a dataset of approximately 23 thousand individuals, Convolutional Neural Network (CNN) models were trained and evaluated. The integration of the model into a web environment for real-time image data input was achieved using the Python Flask library.

The performance analysis of the CNN models revealed nuances between age and gender predictions. The genetic class, encompassing multiple classes (5), exhibited lower precision, recall, F1-score, and support values compared to the gender class, which consisted of only 2 classes. This discrepancy can be attributed to the inherent complexity of predicting multiple genetic classes.

The application's image size, set at 48x48 pixels, influenced accuracy and precision. Larger and higher-resolution images are anticipated to yield more successful results, albeit with potential delays in processing time. Addressing real-time challenges, such as instantaneous changes in predictions from webcam-captured images, required meticulous attention to environmental factors and user-related variables.

Notably, the implementation of a cropping process significantly improved the model's ability to interpret pixel values, mitigating deviations and enhancing accuracy.

To advance these findings, future studies may consider increasing the number of training iterations, incorporating more filters and layers into CNN models, and experimenting with higher-resolution photos. These enhancements could contribute to the refinement and robustness of the predictive models.

In summary, while the study sheds light on the potential of deep learning in image-based predictions, continuous refinement, and adaptation are crucial to addressing challenges and unlocking the full capabilities of these predictive models.

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest in this study.

Declaration of ethical code

In this study, the authors undertake that they comply with all the rules within the scope of the “Higher Education Institutions Scientific Research and Publication Ethics Directive” and that they do not take any of the actions under the heading “Actions Contrary to Scientific Research and Publication Ethics” of the relevant directive.

Authors’ contributions

MU realized the idea and implementation. MFD found and evaluated the performance analyses of the application. He analyzed whether the manuscript conformed to the template. MFD and MU revised the typos and logic errors together and translated the manuscript into English. MFD measured the plagiarism rate. Both authors reviewed and finalized the final version of the manuscript.

Sample Statement:

Author 1: app idea, literature review, coding, analysis result, planning

Author 2: application result, creation of draft text, reducing the similarity ratio

Acknowledgments

I would like to thank my advisor, Assoc. Prof., for his efforts and contributions in the process from the idea phase of this study to the implementation phase and the article writing template. Dr. We would like to thank Mehmet Fatih Demiral.

References

- [1] Ç. Kılınç, “Why Do We Use Matrices for Image Processing?” [Online]. Available: <https://medium.com/@cgtykln/why-do-we-use-matrices-for-image-processing-3b24a59abe4f/>, Accessed on: Jan. 6, 2023.
- [2] N. Arora, "Age, Gender, and Ethnicity Face Data." [Online]. Available: <https://www.kaggle.com/datasets/nipunarora8/age-gender-and-ethnicity-face-data-csv/>, Accessed on: Sep. 2, 2023.
- [3] Protopars, “Derin öğrenme (deep learning) nedir?” [Online]. Available: <https://www.protopars.com/derin-ogrenme-deep-learning-nedir/>, Accessed on: May. 13, 2023.
- [4] Statology, “The easiest way to use seaborn: import seaborn as sns”. [Online]. Available: <https://www.statology.org/import-seaborn-as-sns/>, Accessed on: May. 19, 2023.
- [5] T. Ergin, “Keras ile derin öğrenme model oluşturma” [Online]. Available: <https://medium.com/@tuncerergin/keras-ile-derin-ogrenme-model-olusturma-4b4ffdc35323>, Oct 2, 2018. Accessed on: June 11, 2023.
- [6] E. Uzun, “Makine öğrenmesi” [Online]. Available: <https://erdincuzun.com/makine-ogrenmesi/makine-ogrenmesi-metotlari/>, Accessed on: Jan. 10, 2023.
- [7] M. F. Akca, “Sınıflandırma problemlerindeki metrikler”. [Online]. Available: <https://medium.com/deep-learning-turkiye/s%C4%B1n%C4%B1fland%C4%B1rma-problemlerindeki-metrikler-33ee5f30f8eb>, Accessed on: April. 15, 2023.
- [8] M. U. Uçar, “Recognition of students in the classroom environment and detection of distractions with real-time image processing.” Master's thesis, Department of Electrical and Electronics Engineering, İskenderun Technical University, Hatay, 2019.
- [9] A. Günay, and V. Nabiyevev, “Investigating the effects of facial regions to age estimation.” *Türkiye Bilişim Vakfı Journal of Computer Science and Engineering*, vol. 9, no. 2, pp.1-10, 2016.
- [10] F. Ayata, and H. Çavuş, “Performance tests of ESA, YGH-DVM and DSA algorithms used in face recognition systems.” *Firat University Journal of Science and Technology*, vol. 34, no.1, pp. 39-48, 2022.
- [11] A. Eldem, H. Eldem, and A. Palalı, “Face detection system development with image processing techniques”. *Bitlis Eren University Journal of Science and Technology*, vol.6, no.2, pp. 44-48, 2017.
- [12] G. Gündüz, and İ. H. Cedimoğlu, “Gender estimation with image by using deep learning algorithms.” *Sakarya University Journal of Computer and Information Sciences*, vol.2, no.1, pp. 9-17, 2019.
- [13] K. Kayaalp, and S. Metlek, “Detection of fish species with deep learning.” *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, vol.5, no.3, pp. 569-576. 2021.
- [14] Ö. Toprak, “Age estimation with image processing techniques,” Master's thesis, Institute of Science and Technology, Maltepe University, Istanbul, 2019.



Araştırma Makalesi / Research Article

Kriptografide Rasgelelik Kavramı ve Gerçek Rasgele Sayı Üreteçlerinin Test Metodolojisi

*Concept of Randomness in Cryptography and Testing Methodology of True Random Number Generators*Ali Murat GARİPCAN^{1*}, Ebubekir ERDEM²¹ Fırat Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, agaripcan6223@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9659-8785>² Fırat Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, aberdem@firat.edu.tr ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7401-4964>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 01.11.2023
Revizyon 06.01.2024
Kabul 22.02.2024
Online 29.03.2024

Anahtar Kelimeler:

Rasgelelik, rasgele sayılar, kriptografi, rasgele sayı üreteçleri, istatistikî rasgelelik testleri.

ÖZ

Kriptografik protokollerde gizlilik, karmaşıklık ve sürdürülebilir bir güvenlik anlayışının rasgele sayılar üzerinden tesis edildiği düşünüldüğünde, kriptografi ile rasgelelik arasında kuvvetli bir bağın olduğu görülebilir. Bu sayıların elde edilmesine kaynaklık eden rasgeleliğin niteliği ve matematiksel yöntemlerle garanti edilebilen nicel özellikleri, kriptografik sistemlerinin performansı üzerinde belirleyici bir öneme sahiptir. Dolayısıyla rasgele sayıların elde edildiği ve Rasgele Sayı Üreteci (RSÜ) olarak da özelleştirilmiş uygun tasarım bileşenlerinin seçimi ve değerlendirilmesi kriptografik güvenlik açısından önemli ve zorlu bir görevdir. Zira RSÜ'nin rasgele sayılar üzerinde yol açacağı güvenlik kusurları kriptografik sistemi bütünüyle olası saldırılara karşı savunmasız bırakacaktır. Rasgele sayı dizilerinin istatistiksel özelliklerinin tanımlanması, diğer bir deyişle bu sayı dizilerinin kriptografik amaçlar için kullanılabilirliğini doğrulamak için istatistikî testler kullanılmaktadır. Bu çalışmada kriptografik RSÜ'ler için önemli bir güvenlik kriteri olan rasgelelik kavramı ele alınmış ve bu kavramla bağlantılı istatistikî nicel gereksinimlere ve değerlendirme yöntemlerine odaklanılmıştır. Bu kapsamda hazır test paketlerinin aksine bias, korelasyon, entropi, ki-kare ve standart sapma olmak üzere beş farklı bağımsız test stratejisi kullanılmıştır. Bu testler aynı zamanda Sahada Programlanabilir Kapı Dizileri (Field Programmable Gate Array-FPGA) ortamından elde edilmiş gerçek rasgele sayı dizilerine uygulanmış ve sonuçlar kriptografik gereksinimler doğrultusunda analiz edilmiştir. Literatürde bu maksatla kullanılan çoklu test paketlerinin yanı sıra, sunulan test yöntemleri ile de rasgelelik doğrulaması için geçerli ve güvenilir sonuçların elde edilebileceğini düşünmekteyiz.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 01.11.2023
Received in revised form 06.01.2024
Accepted 22.02.2024
Available online 29.03.2024

Keywords:

Randomness, random numbers, cryptography, random number generators, statistical randomness tests

ABSTRACT

Considering that the confidentiality, complexity, and sustainable security mentality in cryptographic protocols are established over random numbers, it can be seen that there is a strong connection between cryptography and randomness. The qualification of the randomness that is the source of obtaining these numbers and their measurable (quantitative) properties that mathematical methods can guarantee have decisive importance on the performance of cryptographic systems. Therefore, the selection and evaluation of suitable design components from which these numbers are obtained and customized as random number Generator (RNG) is a challenging task in terms of cryptographic security. Because the security flaws that RNG will cause on random numbers will leave the cryptographic system completely vulnerable to possible attacks. Probability theory is used to describe the statistical properties of random number sequences, in other words, to verify the usability of these sequences for cryptographic purposes. In this study, the concept of randomness, which is an important security criterion for cryptographic RNGs, is discussed and the statistical quantitative requirements and evaluation methods related to this concept are focused. In this context, unlike ready-made test packages, five different independent testing strategies were used: bias, correlation, entropy, chi-square, and standard deviation. These tests are also applied to true random number sequences obtained from the Field Programmable Gate Array (FPGA) environment and the results are analyzed consistent with cryptographic requirements. Besides to the multiple test packages used in the literature for this purpose, we think that valid and reliable results can be obtained for randomness verification with the methods presented.

Doi: 10.24012/dumf.1384343

* Sorumlu Yazar

Giriş

Kerckhoff aksiyomu, bir kriptografik sistemin, anahtar dışındaki tüm ayrıntıları herkes tarafından bilinse bile güvenli olacak şekilde tasarlanması gerektiğini fikrine dayanır. Bu aksiyom, daha sonraları şifreleme sistemlerin tasarım ve anlaşılabilirliği ile ilgili teorik temelleri ortaya koyan Claude Elwood Shannon tarafından “*düşman sistemi biliyor*” olarak yeniden yorumlanmıştır. Gizlilik yoluyla güvenlik temelli klasik kriptografinin kapanışını da beraberinde getiren bu yaklaşım, belirsiz bir düzenden bugün açık bir disipline doğru evrilen modern kriptografi’ nin gelişim sürecine de öncülük etmiştir. Öyle ki, günümüz modern kriptografik sistemlerinin neredeyse tamamı “*gizlilik yoluyla güvenlik anlayışının*” aksine, kökleri Shannon ve Kerckhoff tarafından ortaya atılan yaygın kabul görmüş bu temel prensiplere göre tasarlanmaktadır [1]-[2].

Modern kriptografik çalışmalara kaynaklık eden bu temel prensipler özetle; bir kriptografik sistemin güvenliğinin yalnızca anahtarların seçimine bağlı olduğunu ve algoritmanın kendisi de dahil olmak üzere diğer her şeyin genel geçer bilgi olarak kabul edilmesi gerektiğini vurgular. Bu nedenle, modern kriptografik güvenlik protokollerinin neredeyse tamamı uygulanma yöntemleri herkes tarafından bilinen anahtar tabanlı deterministik birer algoritmadır. Deterministikliğin doğası gereği bir güvenlik sistemini temsil eden bu protokollerin hiç biri, çıkışında girişindeki entropi değerinden daha fazlasını üretemez. Dolayısıyla bu protokollerin neredeyse tamamında temel güvenlik varsayımı rasgele üretilmiş gizli veriler (sayılar) üzerine inşa edilir [3].

Rasgele sayılar ile bu sayıların elde edildiği mekanizmalar, kriptografik protokollerin önemli bir tasarım bileşenidir. Taraflar arasında iletişime konu gizli verilerin şifrelenmesinin yanı sıra doğrulaması amacıyla da kullanılan bu verilerin güvenilir olması ve saldırganlar tarafından kolay hesaplanabilir olmaması gerekir. Daha genel bir ifadeyle; bu protokollere yapılacak olası saldırıların etki derecesi, algoritmik karmaşıklıktan ziyade rasgele sayılar için ihtiyaç duyulan temel güvenlik gereksinimleriyle doğrudan bağlantılıdır. Saldırgan sınırsız hesaplama kaynağına sahip olsa bile bu verileri tahmin etmek için başvurabileceği en iyi yöntem, basit bir tahmin veya yazı tura atışından öteye geçmemelidir. Zira her iki durumda da rasgele sayılar için tüm kombinasyonları içeren örneklem uzayı bugün pratik olarak denemeyecek kadar büyüktür. Literatürde kaba kuvvet saldırı olarak da bilinen bu yöntemde, 128 bitlik rasgele anahtarın tüm olasılık uzayı 2^{128} ihtimalden oluşur. Bu, günümüz bilgisayarlarının hesaplama kapasiteleri düşünüldüğünde neredeyse evrenin yaşından daha fazla bir zamana ihtiyacımız olduğunu gösterir. Güvenlik gereksinimlerinin yerine getirilmesi şartıyla örneklem uzayının geniş tutulması, rasgele sayıların kaba kuvvete dayalı tahmin olasılığını da o kadar zorlaştırır. Şifreleme ve de-şifreleme işlemlerinin dışında, kriptografik sistemlerin önemli bir çoğunluğu oturum anahtarları, imza anahtarları ve parametreleri, kimlik doğrulama protokolleri, geçici anahtarlar, sıfır bilgi ispatı, blok şifreler için başlangıç vektörleri ve yan kanal saldırılarına karşı koruma maskeleye işlemleri rasgele sayıların üretim ve kullanımına gereksinim duyan kriptografik uygulamalardan bazılarıdır [4]-[5].

Rasgele sayılar kriptografinin dışında oyun teorisi, istatistiksel analiz, kuantum mekaniği, numerik analiz, fizik ve modern bilgisayar simülasyonları gibi farklı akademik disiplinlerde kullanılmaktadır. Örneğin bazı genetik algoritmalar veya yapay sinir ağı modellerinde rasgele girdilerin oldukça işe yaradığı ve geçerli sonuçlar üretebildiği bilinmektedir. Yine Monte Carlo analizlerinin kullanıldığı entegre devrelerin üretiminde, verimlilik kriterleri ile karakteristik farklılıklara yol açan varyasyonlar ile ilgili sayısal hesaplamalar için de rasgele sayılar kullanılmaktadır. Monte Carlo yönteminde rasgele sayılar özellikle belirsizlik altındaki bir olay(lar)ın olası sonuçlarının önyargılardan bağımsız doğru tahmini açısından oldukça önemlidir. Bu kullanım alanları için rasgele sayıların tahmin edilebilirlik de dahil basit istatistiksel özellikleri yeterli olabilmektedir. Fakat söz konusu kriptografi olunca bu sayıların iyi istatistiksel özelliklerine ek olarak tahmin edilemezlik ve tekrar üretilmezlik gibi temel kriterleri karşılaması istenir. Zira kriptografik protokollerin temel güvenlik varsayımı rasgele sayıların olasılık ve istatistik teorisi ile karakterize edilen bu temel gereksinimleri ne ölçüde karşıladığına bağlıdır [5]-[6].

Kriptografik düzlemde rasgele sayılar, her bir elemanı ‘0’ ve ‘1’ lerden oluşan ve kabul edilebilir bir aralık tahmini için bit düzeyindeki elamanların eşit oluşma olasılığı ile (düzgün dağılımla) birbirinden bağımsız oluştuğu ve elemanları arasında gizli veya açık örüntü barındırmayan bit düzeyinde sayı dizilerini ifade eder. Bu sayılar, Gerçek Rasgele Sayı Üreteçleri (GRSÜ) ve Sözde Rasgele Sayı Üreteçleri (SRSÜ) olmak üzere iki farklı tasarım sınıfından elde edilir. SRSÜ’ ler çoğu zaman tohum değerlere ihtiyaç duyan bir matematiksel fonksiyondur. Giriş ve çıkış değerleri arasında matematiksel bir ilişkinin varlığı, SRSÜ’ leri tahmin edilebilir kılmaktadır. Ayrıca bu üreteçlerde tohum değerler ve algoritmanın gizli kalması sistem güvenliği açısından oldukça önemlidir. Aksi takdirde, teorik olarak sistemin kopyalanarak çıkış dizilerinin kolayca elde edilebilmesi ciddi güvenlik riskleri oluşturabilmektedir. SRSÜ’ lerin aksine, bir GRSÜ radyoaktif çürüme, termal gürültü, faz seçimi, yarı kararlı durumlar gibi fiziksel gerçeklikten beslenerek rasgele sayılar üretebilen, çoğu zaman donanım bağımlı bir cihazdır [7]-[9].

GRSÜ’ lerde temel girdi olan fiziksel kaynağın kontrol edilebilirliğini sağlayan standart bir tanımının olmaması, üretilen sayıları tahmin edilemez ve tekrar üretilmez yapar. Rasgele sayılar için tekrar üretilmezlik gibi önemli bir gereksinimi yerine getirmelerine rağmen, pratikte GRSÜ’ lerin tahmin edilemezlikle bağlantılı istatistiki yeterlilikleri maalesef zayıftır. Fiziksel kaynağın entropi eksikliği, rasgelelik çıkarımı, örnekleme hızı ve gerilim dalgalanmaları gibi çevresel etkiler GRSÜ’ nin hassas kriptografik uygulamalar için kullanımını sınırlandıran bu durumun temel sebebi olarak görülebilir. Saldırganların rasgele sayıların zayıf istatistiksel özelliklerinden faydalanarak yararlı çıkarımlar yapabilmesi, bu sayıların kullanıldığı kriptografik uygulamalar açısından önemli bir güvenlik zafiyetidir. Bu durum, kriptografik protokollerin algoritmik yapısı ne kadar güçlü olursa olsun, güvenilirliği zayıf rasgele sayılar sisteme beklenenden daha kısa sürede başarıya ulaşması muhtemel saldırıların gerçekleşmesine yol açar [5], [10]-[11].

Rasgele sayı üreticilerini ve dolayısıyla rasgele sayıların kriptografik amaçlar için kullanılabilirliğinin test edilmesi, 1960' lı yıllardan günümüze kadar pek çok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Bu noktada sık kullanılan yöntemler üreticilerinin, bilimsel ölçütler çerçevesinde, istatistiksel analizine dayanmaktadır. Kerckhoff aksiyomu düşünüldüğünde, rasgeleliğin kriptografide güvenlik bağlamında özel önem atfedilmiş güçlü bir silah olduğu görülebilir. Dolayısıyla kullanılan sayı dizilerinin rasgelelik açısından istatistiksel gereksinimleri doğru analiz edilmeli ve değerlendirilmelidir. Bu aşamada, olasılık teorisi ve istatistik söz konusu yeterliliklerin matematiksel olarak doğrulanabilmesi için gerekli bilimsel araç ve yöntemler sunulmaktadır. Her ne kadar test edilen sayı dizilerinin gerçek rasgele olup olmadığı veya elde edilme biçimleri hakkında geçerli kanıt sunmasalar da, bu yöntemlerle üreticilerin zayıf ve üstün yönleri de saptanabilir [12].

Bu çalışmada kriptografik RSÜ' lerin temel değerlendirme kriterlerinden biri olan rasgelelik kavramı detaylıca ele alınmış ve rasgelelik varsayımının istatistiksel açıdan doğrulanmasıyla ilgili bağımsız test yöntemlerine ve açıklayıcı bilgilere yer verilmiştir. Kriptografik rasgeleliğin bir dizi olasılık terimi ile karakterize edilmesi nedeniyle çalışma içerisinde hipotez tabanlı test yöntemlerinin olası hataları, farklı kritik önem seviyelerine göre teorik dağılımları ve birbirleriyle olan uyum ve ilişkileri de ele alınmıştır. Bu doğrultuda sunulan test yöntemlerinin deneysel doğrulanması için [13]' te önerilen ve tasarım detaylarına Bölüm 3' te yer verilen GRSÜ mimarisi kullanılmıştır. Bu mimariden elde edilen çıkış dizilerinin istatistiksel yeterliliklerini doğrulamak için bias, korelasyon, entropi, düzgün dağılım, ki-kare, Dieharder ve standart sapma analizleri yapılmıştır. İstatistiksel testlerle gerçek rasgelelik ile iyi sözde rasgelelik ayrımı yapılamaz. Bu nedenle çalışma içerisinde test altındaki sayı dizilerinin güvenilir bir kaynaktan elde edildiği ile geçerli kanıtlar sunabilmek için standart sapma analizine dayalı alternatif bir test yöntemi de sunulmuştur.

Kriptografik RSÜ' lerin istatistiksel yeterliliklerinin bilimsel açıdan doğru yöntem ve araçlarla test edilmesine dönük benzer bir çalışmanın literatürdeki eksikliği çalışmanın temel motivasyon kaynağını oluşturmaktadır. Bu doğrultuda çalışma içerisinde rasgeleliğin kriptografik açıdan önemini vurgulamak ve eksik ve hatalı değerlendirmeler neticesinde sistemde ciddi güvenlik zafiyetine yol açabilecek kriptografik RSÜ' lerin bilimsel açıdan doğru yöntem ve araçlarla test etmenin önemini vurgulanmıştır. Yazarlar olarak çalışmanın bu yönüyle kriptografik düzlemde yapılacak akademik çalışmalara fikir ve uygulama bazında kaynaklık edeceğine inanmaktayız.

Çalışmanın geri kalan kısmı şu şekilde organize edilmiştir: Bölüm 2' de gerçek rasgelelik ile bağlantılı temel istatistiksel gereksinimler sunulmuştur. Bölüm 3' te analiz işlemleri için kullanılan rasgele sayıların elde edildiği GRSÜ mimarisi ile ilgili teorik ve teknik bilgilere yer verilmiştir. Bölüm 4' te bias, entropi, otokorelasyon, lineer karmaşıklık kavramları ve bu kavramların doğrulanması için kullanılan bağımsız test tekniklerine yer verilmiştir. Aynı bölüm içerisinde ek olarak test tekniklerinin uygulandığı rasgele sayılar için elde edilen sonuçlar tartışılmış ve bu sonuçlar, Dieharder istatistiksel rasgelelik testleriyle uyumuna yer verilmiştir. Son bölümünde çalışma, elde edilen sonuçları itibariyle özetlenmiş ve gelecek çalışmalara da yer verilerek sonlandırılmıştır.

Kriptografide Gerçek Rasgelelik Kavramı ve Temel İstatistiksel Gereksinimler

Kriptografik amaçlar için kullanılacak GRSÜ' lerde için temel güvenlik varsayımı, üretilen sayıların fiziksel bir gerçekliğe bağlı olmasının yanı sıra bu sayıların istatistiksel özellikleriyle de güçlü bir şekilde ilişkilidir. Fakat literatürde rasgele sayılar bu için karakteristik gereksinimleri karşılayabilen kriptografik açıdan güçlü bir RSÜ' yü elde etmenin basit bir metodolojisi yoktur. Özellikle fiziksel rasgeleliğin bir sonucu olarak ortaya çıkan ve son işlem teknikleriyle giderilmeye çalışılan istatistiksel zayıflık problemi, GRSÜ' lerin önemli bir eksikliğidir. Aksi takdirde zayıf istatistiksel karakteristiğe bağlı rasgele sayılar üzerindeki herhangi bir öngörülebilirlik, tüm sistemde bir zayıflığa yol açabilmektedir. Dolayısıyla kriptografik amaçlar için kullanılacak RSÜ' lerin tasarım ve analizinin doğru yapılabilmesi, gerçek rasgelelik kavramının felsefik tanımının doğru anlaşılmasıyla birlikte, bu tanımla uyumlu kesin ve nicel yaklaşımların kullanılmasıyla mümkündür.

Düzensizlik (karmaşıklık), öngörülemezlik (tahmin edilemezlik) gibi biçimsel tanımlarla ifade edilmeye çalışılan gerçek rasgelelik kavramı, disiplinlere göre farklı anlamlar içerebilmektedir. Sıradan bir insan için düzenlilik kavramı görsel olarak kolayca ifade edilebilen bir olgu iken, rasgelelik görsel olarak kolayca ifade edilebilen düzenlilik kavramının tam tersi yani, düzensizlik olarak ifade edilebilir. Örneğin bu bakış açısıyla ormandaki ağaçların yerleşimi, depremlerin oluşumu ve atmosferik olayların değişimi gibi evrendeki pek çok olayın düzensiz olarak yani gerçek rasgele meydana geldiği söylenebilir. Tahmin edilemezlik açısından ise rasgelelik kavramı, geçmişi bilinen bazı olayların gelecek sonuçlarının tahmin edilebilir olduğu deterministikliğin tam tersi bir kavram olarak düşünülebilir. Dolayısıyla rasgele olduğu varsayılan olayların gelecek veya önceki durumları arasında tahmin edilebilirliğe yol açan bir bellek etkisi olmamalı ve bu olaylar birbirinden tamamen bağımsız olarak meydana gelmelidir [12], [14].

Gerçek rasgelelik kavramının var olup olmadığına dair felsefik sorular da barındıran farklı tanımları da mevcuttur. Fakat kriptografide esas alınan tanımı, daha ziyade güvenlikle bağlantılı olan öngörülemezlik kavramıyla örtüşmektedir. Bu bağlamda; gerçek rasgelelik, bazen bir değer olan olası çıktılarının yeniden üretilemeyeceği fiziksel işlemleri kapsadığı sonucunu doğurur. Sıradan bir bakış açısıyla, havaya atılan hilesiz bir madeni paranın beklenen olası sonuçlarının gerçek rasgele olduğu söylenebilir. Fakat paranın hileli olması durumunda olasılık dağılımına ait sonuçlar, bu sonuçların tahminini mümkün kılan sistemik bir hata payı ile meydana gelir. Olasılıksal dağılımın muhtemel çıkışlardan biri etrafında yoğunlaşmasına yol açan bu hata payı, havaya atılan paranın gelecekteki sonuçlarının tahmin edilebilirliğini, rasgelelik dizilimini açısından bozabilir. Özetle, hilesiz bir madeni bir paranın havaya atılması gibi düşük seviyeli rasgele olaylardan elde edilebilecek 128 bitlik bir sayı dizisi her ne kadar gerçek rasgele olsa da kriptografik kullanım açısından yetersiz olabilir. Ya da tamamen adil gerçek rasgele bir rulet çarkını çevirdiğinizde, gerçekleşme olasılığı düşük olayların bilinirlik yönüyle daha fazla bilgi içerdiği düşünüldüğünde, kaybedeceğinizi tahmin etmek pek de zor olmasa gerek. Oysaki sayı dizisinin rasgelelik dağılımı

kriptografik güvenlik açısından yeterince tahmin edilemez olmayı gerektirir [15]-[16].

Rasgelelik ile tahmin edilemezlik arasında matematiksel tanımı Denklem 1' de verilen ve entropi olarak adlandırılan matematiksel ayırt edici bir kavram daha bulunur. Bir rasgele değişkenin belirsizlik ölçüsü olarak da bilinen entropi, dizi elemanlarının oluşma olasılığının ideal değere yani $1/2^n$ ye yakın dağılımları için tepe değerine ulaşılır, yani 1^n e eşit olur. $X_n = x_1 x_2 x_3 \dots x_n \in \{0,1\}^n$ şeklindeki n bitlik rasgele sayı dizisinde entropinin yüksek olması, bu sayı dizisindeki öncül veya ardıl herhangi bir bitin $1/2^n$ den daha yüksek olasılıkla tahmin edilemeyeceğini garanti eder. Bu ideal olasılığın sayı dizisindeki tüm bitler için geçerli olması veya olmaması durumuna bağlı olarak n bitten oluşan gerçek bir rasgele sayı dizisinin toplam entropisi, $0 - n$ bit arasında bir değere sahip olabilir [1], [7].

Tahmin edilemezliği garanti edebilmek için rasgele sayı dizilerinde entropi olabildiğince dizi boyutuna yakın bir değer olması istenir. Örneğin 100 bitlik bir rasgele sayı dizisi için 20 bitlik düşük entropi değeri, aynı zamanda bu sayı dizisinin $1/2^{20}$ lik bir olasılıkla doğru tahmin edilebileceğini gösterir. Diğer bir deyişle bu sayı dizisinin muhtemel bütün olasılıkları (olasılık kümesi) 2^{20} adet deneme-yanılma ile bulunabilir. Oysaki rasgele sayıların kullanıldığı günümüz modern kriptografik protokollerinde gizlilik, tüm olasılıklar kümesinin pratikte denemeyecek kadar büyük (en az 2^{100} bit ve üzeri) olmasını gerektirir. Dolayısıyla tahmin edilemezlik açısından GRSÜ' lerde bit başına entropinin yüksek olması ve çıkış olarak üretilen sayı dizilerinin toplam entropisinin olabildiğince dizi boyutuna eşit olması istenir [4], [10].

$$H(x) = - \sum_{i=0}^{n-1} p_i \cdot \log_2 p_i \quad (1)$$

Kriptografik RSÜ' ler için temel değerlendirme kriteri olan güvenlik ile bağlantılı tasarım gereksinimleri Tablo 1' de verilmiştir. Tablo 1' deki karakteristik gereksinimler, RSÜ' lerin kullanıldıkları kriptografik uygulamaların önem seviyesine göre değişiklik gösterebilmektedir. Örneğin R1 ve R2 gereksinimleri fiziksel GSRÜ' ler için özelleştirilmiş tasarım gereksinimleri olmakla birlikte, hassas kriptografik uygulamalar için mutlaka yerine getirilmelidir. Bu gereksinimler kapsamında rasgele sayı dizilerinin saldırganlar için yararlı çıkarımlar sağlayabilecek hatalı olasılıksal dağılımlar (bias) ve güçlü istatistiki bağımlılıklar (korelasyon) içermemesi istenir. Kriptografik güvenlikle bağlantılı Tablo 1' deki gereksinimler, her ne kadar iyi tanımlanmış ve anlaşılabilir olsa da pratikte bu gereksinimleri başarıyla yerine getirebilen kusursuz bir RSÜ metodolojisi yoktur [1], [5], [9].

Herhangi bir üreticinin veya bu üreticiden elde edilmiş sayı dizilerinin rasgelelik açısından değerlendirilmesi, sezgisel bir tanımdan ziyade olasılık teorisi ve istatistiki araç ve yöntemleri uygulamaktan geçer. Çünkü pratikte bir üreticinin gözlemlenemeyen özelliğini temsil eden gerçek rasgeleliğin, kriptografide mantıksal ve fiziksel kanıtı yoktur. Dolayısıyla sayı dizilerinin gerçek rasgele mi yoksa bir düzen içerisinde

üretilip üretilmediğine karar vermek için kullanılan testler, olasılık ve istatistik teorisinden yararlanır.

Tablo 1. Kriptografik rasgele sayı üreticileri için temel karakteristik gereksinimler

Gereksinim Adı	Gereksinimin Açıklaması
R1 Gereksinimi:	Kriptografik uygulamalarda kullanılacak rasgele sayılar iyi istatistiksel özelliklere sahip olmalıdır.
R2 Gereksinimi:	Rasgele sayıların alt dizilerinin bilmesi halinde, saldırganın öncül ve ardıl rasgele sayıları hesaplanmasına veya yüksek doğrulukla tahmin etmesine izin verilmemelidir.
R3 Gereksinimi:	Bir RSÜ' nin bilinen mevcut iç durum değerinden yola çıkarak veya iç durum bilgisine ihtiyaç duymadan önceki üretilen rasgele sayıları, yüksek doğrulukla tahmin edebilmek veya hesaplayabilmek mümkün olmamalıdır.
R4 Gereksinimi:	Bir RSÜ' nin bilinen mevcut iç durum değerinden yola çıkarak veya iç durum bilgisine ihtiyaç duymadan gelecek rasgele sayıları, yüksek doğrulukla tahmin edebilmek veya hesaplayabilmek mümkün olmamalıdır.

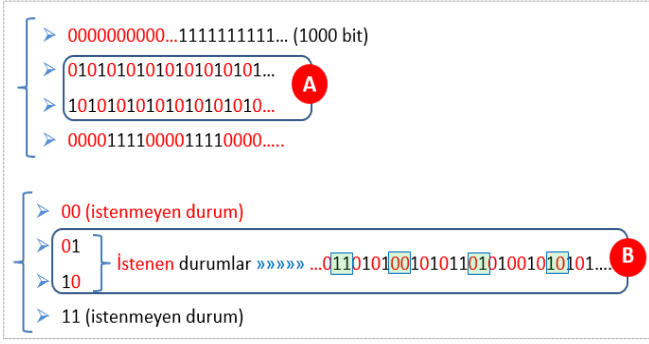
R1 gereksinimi kapsamında GRSÜ' nin ideal gerçek bir $X_n \in \{0,1\}^n$ rasgele sayı dizisinin istatistiki açıdan Denklem 2 ve 3' teki olasılıksal dağılımlar ile üretmesi beklenir [10], [17].

$$\varepsilon = |\text{Prob}(X_n = 0) - 0.5| = |\text{Prob}(X_n = 1) - 0.5| \quad (2)$$

$$\text{Prob}(\text{Transitions}) = \frac{1}{2} \quad (3)$$

İyi bir rasgele sayı dizisinde, bit düzeyindeki elemanların oluşma olasılığının birbirine eşit veya çok yakın olması istenir. Bit düzeyindeki bu sayı dizilerinin oluşma olasılığı için ideal istatistiki değer $1/2^n$ dir. Diğer bir deyişle rasgele sayı dizileri mümkünse bias olarak da isimlendirilen eşit oluşma olasılığının dışında bir sapma payıyla oluşmamalıdır. Bit düzeyindeki bir rasgele sayı dizisinin olası sonuçları arasında oluşan bias, Denklem 2' deki bağıntı ile ifade edilebilir. Dizi elemanlarının $1/2^n$ lik ideal oluşma olasılığına sahip bir istatistiki dağılımla oluştuğu durumlarda $\varepsilon = 0$ olur ve sayı dizilerinin biasız oluştuğu kabul edilir.

Fakat çoğu durumda rasgele sayılar için Denklem 1' deki ideal istatistiki tanımın tek başına yerine gelmesi kriptografik açıdan yeterli olmayabilir. Örneğin Şekil 1 (A)' da rasgele sayılar için istatistiki açıdan her ne kadar ideal dağılım ölçüsü sağlanmış olsa da benzer tekrarlı örüntülerden oluştukları için lineer karmaşıklıkları oldukça düşüktür. Oysaki tahmin edilemezlik açısından rasgelelik, önceki tüm durumları bilinen bir X_n , $n = 0,1,2,3 \dots$ şeklindeki sayı dizisinde X_{n+1} elemanı tahmin etmek için ihtiyaç duyulan hesaplama karmaşıklığına dayanır. Bu durum, istatistiki gereksinimlerle karakterize edilen gerçek rasgeleliğin önemli bir tamamlayıcı unsurudur [12]-[18].



Şekil 1. Linear karmaşıklık açısından rasgele sayılar için olumlu ve olumsuz dağılım örneği

Şekil 1 (B)' de tasvir edilen Denklem 2' deki bir diğer özellik için, ortalama her ikinci rasgele sayının bit değerinde, bir önceki üretilen rasgele sayının bit değerinden farklı bir geçişin (0 → 1, 1 → 0) olması beklenir. Sayı dizisi içerisinde bu rasgele geçişler için iki bitlik "01" ve "10" kombinasyonları kabul edilebilir durumlardır. Dizi elemanlarının eşit oluşma olasılığının yanı sıra ortalama her iki bitte bir kendini tekrar etmesi istenen bit seviyedeki bu geçişlerin toplamının sayı dizisinin toplam uzunluğuna oranı da 1/2 olmalıdır. Fakat kabul edilebilir kombinasyonların dizi içerisinde tamamen gerçek rasgele bir formda dağılması istenir. İstenen durumların gerçek rasgele bir formda dağıldığı n bitlik yeterince uzun bir rasgele sayı dizisinde, "11" ve "00" gibi bias oluşumuna neden olan durumlar da dahil "00", "01", "10" ve "11" gibi 4-bitlik tüm kombinasyonların elde edilebileceği unutulmamalıdır [19]-[20].

Denklem 2 ve 3' teki ideal istatistiki tanımlar doğrultusunda, Şekil 2' deki örnekte ilk senaryo için herhangi bir bitini bildiğimiz bir gerçek rasgele sayı dizisinin sonraki iki bitini tahmin etmeye çalışalım ve bunu n defa tekrar ettiğimizi varsayalım. İdeal bir rasgele sayı dizisinin istatistiki açıdan düzgün bir dağılıma sahip olması, iki bitlik (00, 01, 10, ve 11) olası kombinasyonların dizi içerisinde eşit oluşma olasılığıyla meydana gelmesiyle mümkündür. Tüm ikili kombinasyonların frekansının eşit olduğu bu durum, aynı zamanda rasgele sayılar için tahmin edilebilirliğin istatistiki açıdan en zor olduğu durumdur. Şekil 2 (B) ve (C)' deki gibi istatistiki dengesizlik, rasgele sayıların ayrıcalıklı saldırganlar tarafından yüksek doğrulukla tahmini mümkün kılacak yararlı bilgiler sunabilmektedir. Örneğin Şekil 2 (B)' de tahmin edilecek sonraki ikili kombinasyonun "00" olma olasılığı %50 iken, 2 (C)' de ise %70 gibi istenmeyen yüksek bir orandır. Fakat bu olasılığın tüm ikili kombinasyonlar için Şekil 2 (A)' daki ideal bir istatistiki dağılımda sadece %25 olduğu unutulmamalıdır. Benzer durum Şekil 3' teki bir bitlik tahmin için de geçerlidir. Benzeri şekilde dengesiz bir istatistiki dağılımla oluşmuş Şekil 3 (C)' de bir rasgele sayı dizisinde, sonraki bit değerinin

'1' olma olasılığı %80' dir. Oysaki düzgün istatistiki dağılımla oluşmuş gerçek rasgele sayılar, bu sayılar üzerinde bir saldırganın basit bir yazı tura atma olasılığından veya kör bir tahminden daha fazlasına müsaade etmemelidir.

Denklem 2 ve 3' te tanımlı iyi istatistiki özelliklerinin yanı sıra rasgele sayılar için bir diğer önemli karakteristik gereksinim ise bağımsızlık varsayıdır. Bağımsız olduğu varsayılan rasgele sayı dizileri, bu sayıların yüksek doğrulukla tahminini mümkün kılacak güçlü istatistiki bağımlılıklar yani korelasyon içermemelidir. Nitekim pratikte fiziksel bir GRSÜ için pek te mümkün olmayan bağımsızlık varsayımı aynı zamanda biasın temel sebeplerinden biri olarak görülebilir. Örneğin oluşma olasılıkları $E(X)$ ve $E(Y)$ olan X ve Y gibi n bitlik iki rasgele sayı dizisi için oluşma olasılığı, μ ve korelasyon katsayısı, ρ olsun. Bu dizilerin XOR' lanmasıyla elde edilen yeni dizinin $(X \oplus Y)$ oluşma olasılığı,

$$E(X \oplus Y) = \frac{1}{2} - 2\left(\mu - \frac{1}{2}\right)^2 - 2\rho\mu(1 - \mu) \quad (4)$$

Denklem 4' teki gibi hesaplanır. Eğer $E(X)$ ve $E(Y)$ için μ değeri 1/2' ye yaklaştıkça Denklem 4 aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir.

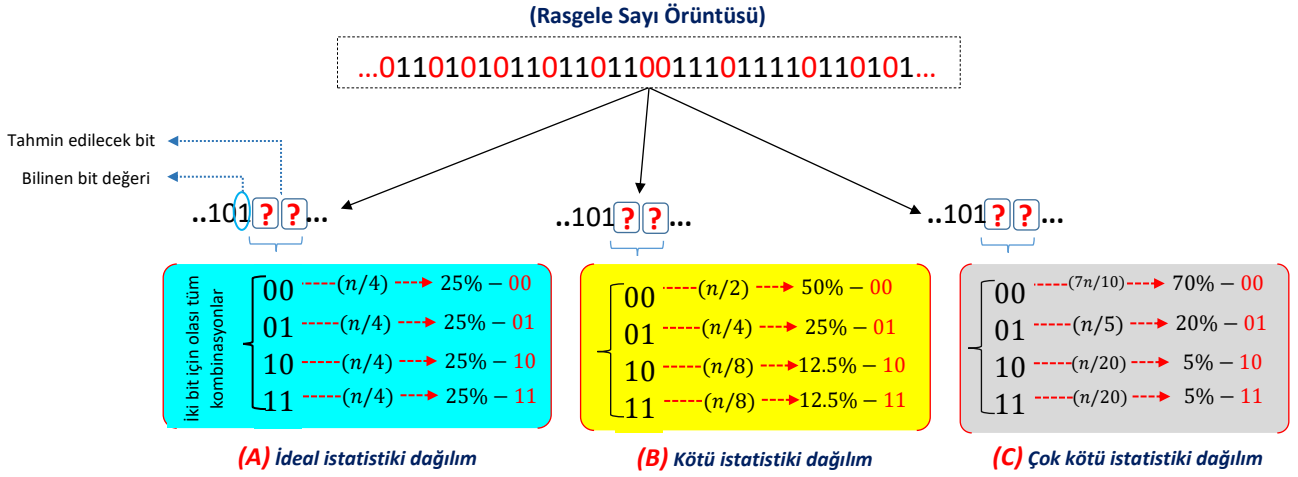
$$E(X \oplus Y) \approx \frac{1}{2}(1 - \rho) \quad (5)$$

Denklem 5' ten iki dizi arasındaki korelasyonun aynı zamanda biasın oluşumuna da yol açtığı görülebilir. X ve Y dizilerinin korelasyonuz olduğu durumlarda $\rho = 0$ 'dır ve $E(X \oplus Y) \approx \frac{1}{2}$ ' ye yakınsar. Denklem 4 ve 5' teki gözlemler korelasyon katsayısının bias üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir. Bu durumda kriptografik rasgelelik açısından bias, korelasyon ve tahmin edilemezlik kavramlarının birbiriyle doğrudan bağlantılı olduğu açıkça söylenebilir.

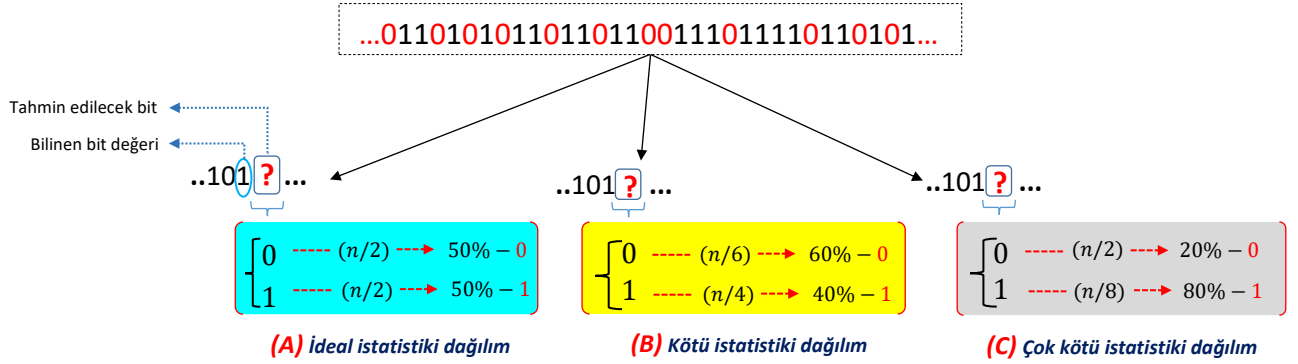
Gerçek Rasgele Sayı Üretici Mimarisi

Çalışma içerisinde test amaçlı kullanılan rasgele sayı dizileri, blok mimarisi ve davranışsal modellemesi sırasıyla Şekil 5 ve 6' da verilen serbest salınımlı halka osilatörlerin (HO) kullanıldığı GRSÜ mimarisinden gerçek zamanlı olarak elde edilmiştir. İyi istatistiki özelliklerinin yanı sıra düşük frekanslarda çalışabilme, yüksek çıkış bit hızı, sayısal mantık cihazlarına kolay entegre edilebilme ve tasarım esnekliği gibi öne çıkan özellikleri, bu mimarinin tercihinde belirleyici sebeplerdir.

GRSÜ' nin gürültü kaynağı, kendi içerisinde her biri 13 adet gecikme elemanından (invertör) oluşan paralel bağlı 114 adet HO' dan oluşur. Şematik yapısı Şekil 4 (a)' da verilen HO' lar girişi ve çıkışı arasında bir geri besleme yolu ile ardışıl



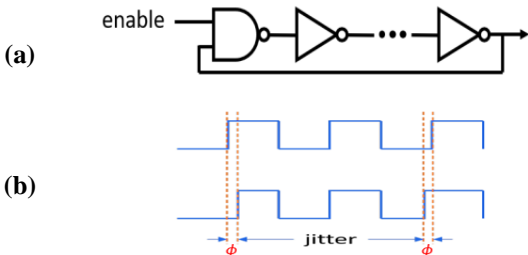
Şekil 2. İki bitlik tahmin için rasgelelik ve tahmin edilemezlik arasındaki istatistiksel ilişki



Şekil 3. Bir bitlik tahmin için rasgelelik ve tahmin edilemezlik arasındaki istatistiksel ilişki

(b) jitter oluşumu

bağlı tek sayıda eviriciden oluşur. Mantık devrelerinin üretim ve çalışma şartlarına bağlı farklılıklar nedeniyle HO çevrimindeki her bir mantık kapısı, kararsız yayılım ve yönlendirme gecikmesine sahiptir. Bu durum, Şekil 4 (b)'deki gibi üretilen saat sinyallerinin periyodik düzensizliğine yol açarak HO'ların frekanslarının farklı olmasına neden olur. Her çevrimde saat sinyallerinin yükselen ve düşen kenar geçişlerinde meydana gelen zamansal gecikmenin yönü ve miktarı pratikte öngörülemezdir. Zamana bağlı artış gösterme eğilimindeki bu kararsız durum, yerel (termal gürültü ve titreme gürültüsü vb.) ve global (cihazın çalışma şartlarına bağlı güç kaynağı ve sıcaklık değişimleri vb.) değişkenlerin etkisiyle gerçek rasgele meydana gelir [13], [21].



Şekil 4. (a), halka osilatörün kombinasyonel yapısı,

GRSÜ mimarisinin donanımsal gerçekleştirimi için Altera Cyclone IV FPGA geliştirme kartı kullanılmıştır. GRSÜ'nin her bir bileşenin davranışsal modellemesi ve sentezleme işlemleri için Quartus uygulama geliştirme platformu kullanılmıştır. Bu platform üzerinde devre elemanlarının mantıksal tasarım ve simülasyon işlemleri için Hardware Description Language (VHDL) donanım tanımlama dilinden yararlanılmıştır. Bu teknik bilgiler ışığında kullanılan GRSÜ mimarisinin Quartus ortamında davranışsal modellemesi Şekil 6'daki gibidir.

Şekil 6'daki mimarinin çalışma prensibi özetle şu şekildedir: Sistemde osilatörlerin yüksek salınımlı çıkışları, çok girişli ve tek çıkışlı bir XOR devresi (*xorcircuit114*) yardımıyla birleştirilmiştir. Ardından birleştirilerek non-periyodik bir işarete indirgenen yüksek frekanslı bu çıkışlar, iki ayrı D-türü flip-flop (*DF1* ve *DF2*) yardımıyla örneklenerek saf gerçek rasgele sayılar elde edilir. Aynı non-periyodik girdi için örnekleme işlemi 50 MHz'lik referans saat sinyalinin düşen ve yükselen kenar geçişlerinde ayrı ayrı yapılır. İki ayrı fazda üretilen ve karakteristik olarak birbirinden farklı bit düzeyindeki bu rasgele sayılar, iki farklı birleştirme devresine (*combiner_circuit1* ve *combiner_circuit2*)

atanarak 8-bitlik vektörel işaretlere dönüştürülerek, XOR devresine (*xor_8bit*) giriş olarak uygulanır.

Son aşamada ise; saf rasgele sayıların oluşturduğu bu 8 bitlik vektörler, s-box tabanlı düşük alan-enerji gereksinimli, sıkıştırmasız son işlem tekniğine tabi tutulur. Bu aşamada 8 bitlik saf rasgele sayılar, [22]' de önerilen ve içeriği Tablo 2 ve 3' te verilen kaos tabanlı sabit s-box' ların oluşturduğu statik hafıza bloklarında (*sbox1* ve *sbox2*) yer değiştirme işlemine tabi tutulur. Yer değiştirme işleminde, 8 bitlik giriş vektörlerinin ilk dört biti satır, son dört biti ise sütun değeri olarak alınır. Çıkış vektörleri (*GRSU_out1* ve *GRSU_out2*) ise, bu değerlerin Tablo 2 ve 3 üzerindeki kesişimlerine denk gelen 0-255 arasındaki tam sayı değerleriyle yer değiştirilerek elde edilir. S-box' ların içeriklerinin birbirinden farklı olmasından dolayı, aynı 8 bitlik giriş vektörlerine karşılık elde edilen 8 bitlik çıkış vektörleri de birbirinden farklıdır. GRSÜ mimarisini her çevrimde, gürültü kaynağından elde edilen 8 bitlik saf rasgele sayı dizisi için s-box tabloları üzerinden her biri 8 bitlik toplamda 16 bitlik gerçek rasgele çıkış dizisi üretir. Sistemde çıkışlar rasgelelik analizi için Şekil 5' teki gibi hafıza mimarisine kaydedilmiştir. Hafıza içerikleri, cihaz çalışır durumda iken Joint Test Action Group (JTAG) arabirimi aracılığıyla gerçek zamanlı olarak elde edilmiştir.

Tablo 2. Henon harita tabanlı kaotik s-box

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
0	99	161	159	152	130	108	234	90	252	240	194	40	85	204	57	81
1	149	206	214	88	15	62	55	105	116	61	83	225	74	135	118	218
2	249	134	126	1	2	227	44	72	229	52	199	29	226	172	69	238
3	205	7	45	32	187	10	53	76	21	26	175	107	146	171	98	169
4	200	35	39	67	110	3	113	170	125	5	165	112	155	198	163	236
5	254	97	91	123	168	96	222	241	124	27	68	212	251	141	129	102
6	223	71	215	59	239	34	211	43	109	122	4	213	48	144	228	158
7	217	232	156	242	188	87	147	28	127	114	42	101	84	136	209	64
8	31	253	100	18	184	93	231	12	120	51	220	192	244	245	202	132
9	63	150	250	9	142	54	193	145	60	185	49	210	50	65	111	30
A	237	151	181	47	115	143	160	246	70	94	186	148	180	189	58	247
B	106	24	208	174	157	137	82	14	219	154	128	25	22	75	41	36
C	139	8	235	164	140	248	37	138	182	191	121	255	216	177	11	79
D	167	23	73	162	104	86	166	178	33	133	78	56	131	190	183	46
E	66	77	179	221	119	176	0	224	203	196	230	103	19	201	233	92
F	173	16	195	197	20	207	6	80	95	89	117	13	153	243	17	38

Tablo 3. Chen sistem tabanlı kaotik s-box

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
0	11	12	55	156	97	136	92	130	183	159	89	158	184	13	23	57
1	99	245	93	242	160	116	249	142	146	141	28	226	244	78	69	112
2	85	178	207	231	110	135	7	58	202	239	100	45	129	220	113	238
3	108	102	210	51	193	48	230	194	21	95	248	111	246	192	243	204
4	39	247	236	132	35	218	61	88	222	38	47	134	227	235	166	201
5	252	6	180	87	138	16	144	104	105	131	26	203	59	91	64	206
6	139	127	198	62	18	50	70	80	73	175	53	71	76	161	221	254
7	40	211	181	219	234	37	170	119	43	128	255	151	241	189	10	123
8	195	27	223	205	217	197	30	200	188	49	101	216	75	162	25	63
9	121	60	84	34	164	149	187	171	126	176	31	191	2	165	212	143
A	67	125	19	224	81	4	208	174	52	118	44	41	66	148	14	250
B	225	150	145	185	9	137	232	77	117	168	182	251	167	36	0	72
C	240	214	74	96	20	190	154	213	215	106	209	196	153	90	65	82
D	253	177	115	169	22	233	120	157	68	42	1	133	3	163	33	56
E	179	83	54	199	79	109	186	122	15	5	114	147	46	228	173	94
F	32	103	229	107	237	155	98	124	172	140	24	17	86	29	8	152

Rasgeleliğin İstatistiksel Doğrulama Metodolojisi Ve Kullanılan Test Teknikleri

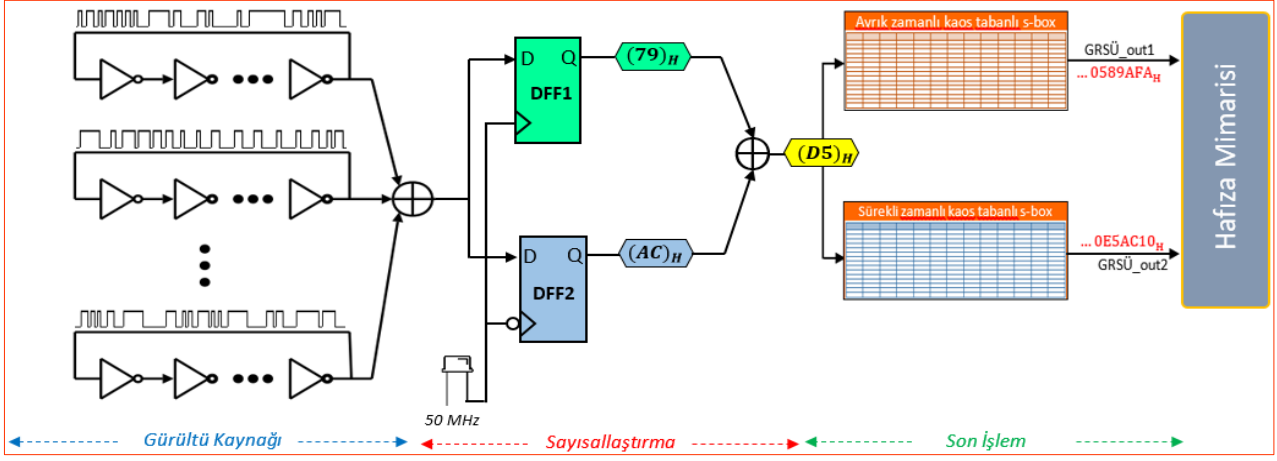
Olasılık terimleriyle karakterize edilebilen ve istatistiksel bir özellik olan rasgelelik, herhangi bir sayı dizisinin özelliklerinin gerçek bir rasgele sayı dizisinin beklenen özellikleriyle karşılaştırılmasına imkân sağlar. Literatürde herhangi bir sayı dizisinin rasgele olup olmadığına karar verebilmek için yaygın olarak hipotez tabanlı test teknikleri kullanılmaktadır. Belirli bir anlamlılık seviyesinin (önem derecesinin) dikkate alındığı bu testlerin tamamı, rasgelelik varsayımını doğrulayan belirli bir geçersiz hipotezin (H_0) doğruluğunu test etmek için formülize edilmiştir. Alternatif hipotez (H_a) ise dizinin rasgele olmadığını ileri sürer. Her bir test kriterinin başarısız olduğu diğer bir deyişle alternatif hipotezin kabul edildiği durumlarda H_0 hipotezi reddedilmiş olur. Mevcut her test için bir rasgelelik istatistiği seçilir ve bu istatistik geçersiz hipotezin reddine karar vermek için kullanılır.

Kriptografi de dahil olmak üzere rasgele sayıların üretim ve kullanımına ihtiyaç duyulan farklı uygulamaların güvenliği, kullanılan rasgele sayıların kalitesiyle doğrudan bağlantılıdır. Rasgele sayıların istatistiksel yeterliliklerinin doğru saptanabilmesi için bu sayı dizilerinin yeterince uzun olması gerekir. Gerçek rasgele olup olmadıklarının yanı sıra bu sayı dizilerinin tahmin edilemezlik ve bağımsızlık varsayımları istatistiki araç veya yöntemlerle mutlaka doğrulanmalıdır. Bu maksatla önerilmiş hipotez tabanlı farklı testler bulunmaktadır. Test yöntemleri, H_0 hipotezini doğrulamak için uygulandıkları sayı dizileri üzerinde, bu dizilerin rasgele olmadığına işaret edecek örüntüleri tararlar [13].

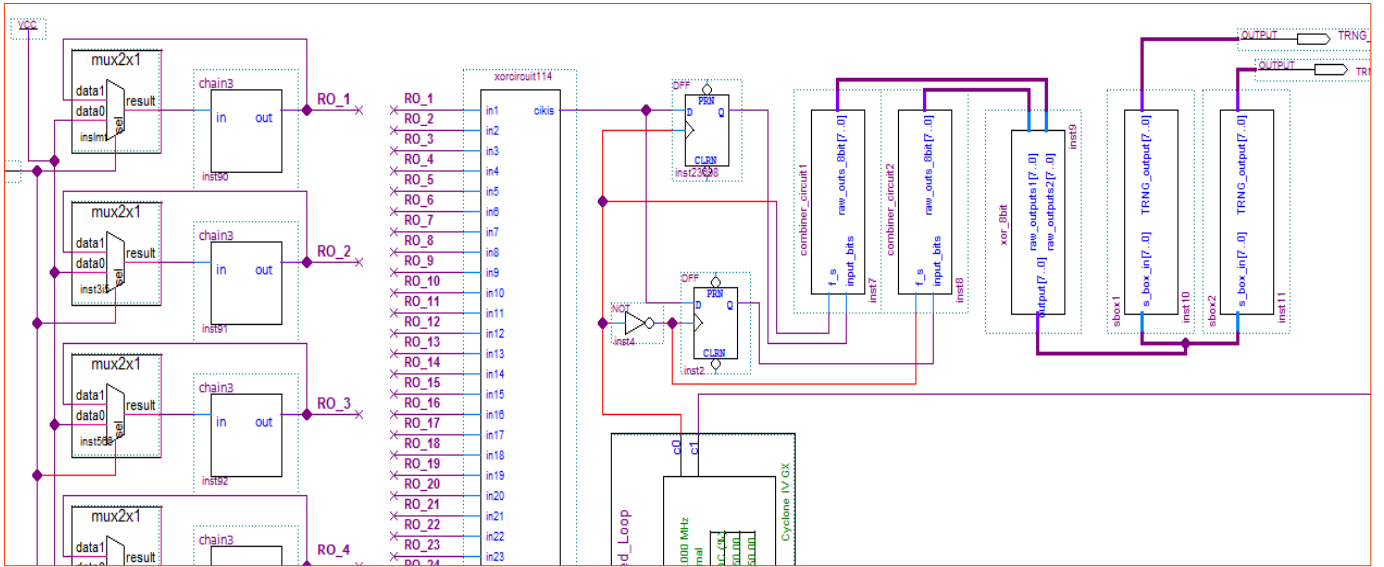
Çalışmanın bu bölümünde gerçek rasgele üretilmiş sayı dizilerinin rasgelelik varsayımını doğrulamak için kullanılacak test tekniklerine, bu testlerin uygulama yöntemlerine ve uygun parametre seçimlerine yer verilmiştir. Bu kapsamda bias, korelasyon, entropi, karmaşıklık ve gerçek rasgelelik olmak üzere beş farklı test tekniği ele alınmıştır. Test teknikleri her biri 524.288 bitten oluşan toplamda 100 farklı rasgele sayı dizisine uygulanmıştır. Teste tabi sayı dizileri, GRSÜ mimarisinden gerçek zamanlı olarak elde edilmiş ve ilgili test formatına uygun biçime dönüştürülmüştür. Test tekniklerinin farklı anlamlılık seviyelerinin seçimine bağlı olarak rasgelelik dağılımı üzerindeki istatistiki etkisi, analiz edilmiş ve yine bu testlerin uygulanmasına ilişkin bazı öneriler sunulmuştur.

Bias Analizi

Kriptografik amaçlar için kullanılacak ideal bir rasgele sayı dizisinde, bu diziyi oluşturan bit düzeyindeki elemanların oluşma olasılığı açısından beklenen değeri ($E(X)$) birbirine eşit yani $1/2$ olmalıdır. Herhangi bir sayı dizisi için bu ideal istatistiki dağılım ölçüsünden sapma miktarı bias olarak adlandırılır. Rasgele sayı dizisinin oluşma olasılığının ideal değerden sapma miktarı, bu sayı dizilerinin rasgele olmadığına karar verebilmek için tek başına yeterli bir kanıt sunabilmektedir.



Şekil 5. GRSÜ'nin temel tasarım bileşenleri



Şekil 6. GRSÜ'nin Quartus ortamında davranışsal modellemesi

Bit düzeyindeki rasgele sayıların olasılıksal dağılımlarını incelemek için frekans (monobit) testi kullanılmıştır. Yarı normal dağılımın referans alındığı testin temel odak noktası, n bitlik rasgele sayı dizisinde 1'lerin veya 0'ların frekansının $n/2$ 'lik beklenen ideal değere yakınlığını tespit etmektir [18]. $X = x_0x_1x_2 \dots x_{n-1}$ n bitlik rasgele sayı dizisi olmak üzere Monobit testinin matematiksel tanımı Denklem 6-8'deki gibidir. Denklem 6 ve 7'de X_{dif} ve S_{obs} sırasıyla rasgele sayı dizisinin elamanları için hesaplanan kümülatif fark ve bu fark değerine karşılık hesaplanan görece p_{value} değeridir. $erfc$ tamamlayıcı hata fonksiyonu olmak üzere gerçek p_{value} değeri, diğer bir deyişle test istatistiği Denklem 8'deki gibi hesaplanır. Hipotez tabanlı testlerin sonuçlarını yorumlamak için test istatistiğini temsil eden p_{value} değeri dikkate alınır. Hipotez tabanlı bir teste H_0 hipotezinin kabul edilebilmesi için $[0 - 1]$ aralığında değişken değerler alabilen p_{value} 'nin anlamlılık seviyesine (α) eşit veya daha büyük olması gerekir. p_{value} 'nin anlamlılık seviyesinden düşük olduğu aksi durumlar, H_0 'nın reddedilmesi veya alternatif hipotezin H_a 'nın kabulü ile ilgili güçlü kanıtlar sunar. Frekans testi için istatistiksel önem seviyesi çalışma kapsamında 0.01 olarak seçilmiştir. Testin başarılı kabul edilebilmesi için $p_{value} \geq \alpha$

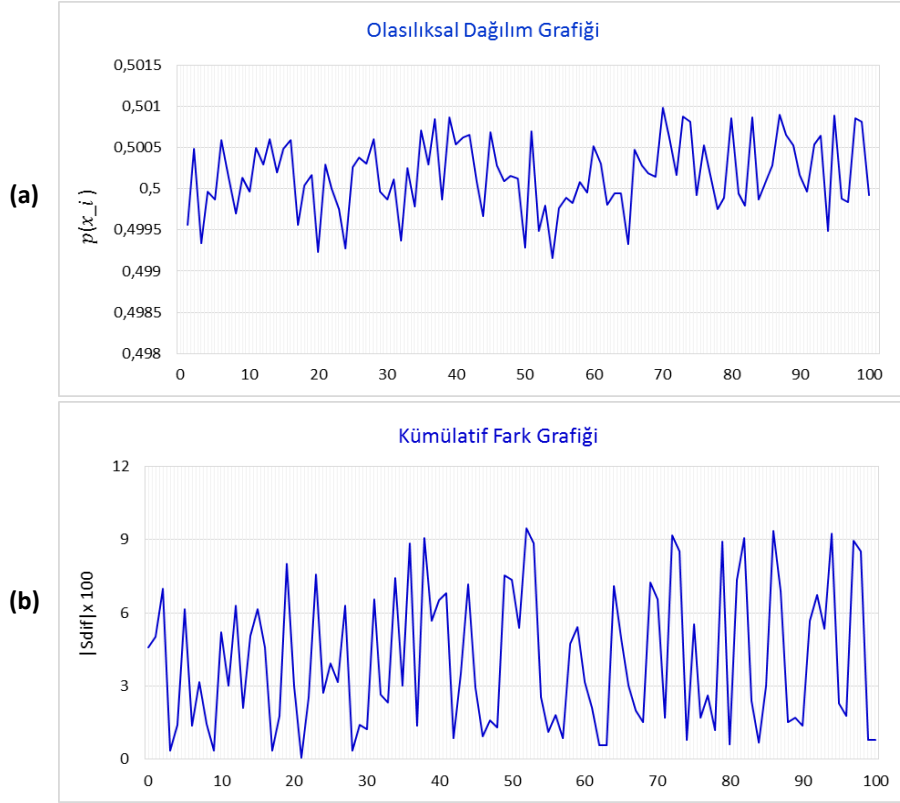
şartının mutlaka sağlanması gerekir. Bias analizi için test edilen 100 farklı rasgele sayı dizisinin olasılıksal dağılımları ve frekans testi sonuçları Şekil 7'deki gibidir.

$$X_{dif} = y_1 + y_2 + y_3 \dots + y_n \quad \text{ve} \quad y_i = 2x_i - 1 \quad (6)$$

$$X_{obs} = \frac{|X_{dif}|}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

$$p_{value} = erfc(z) = erfc\left(\frac{X_{obs}}{\sqrt{2}}\right) = \frac{2}{\pi} \int_z^{\infty} e^{-u^2} du \quad (8)$$

Şekil 7 (a)'daki sonuçlar incelendiğinde test edilen sayı dizilerinde, dizi elemanlarının oluşma olasılıklarının $1/2$ 'lik ideal değere yakın varyasyonlarla oluştuğu görülebilir. Bu sonuçlar bir diğer yönüyle Frekans testinin başarılı olabilmesi için ihtiyaç duyulan ve Şekil 7 (b)'de verilen dizi elemanları arasındaki kümülatif fark değerleri ile de uyumludur. Test edilen her bir dizinin 524.288 bitten oluştuğu düşünüldüğünde, frekans testinde $p_{value} \geq \alpha$ şartının yerine gelebilmesi için dizi elemanları arasındaki kümülatif fark için



Şekil 7. Test edilen sayı dizilerinin (a) bit düzeyinde olasılıksal dağılımları ve (b) bu olasılık değerleri için hesaplanmış kümülatif fark değerleri

sınır değer, $erfc(a)^{-1} = erfc(0.01)^{-1}$ için $|S_{dif}| = 1821'$ dir. Kümülatif farkın sınır değerinin üzerinde gerçekleştiği aksi durumlarda, $p_{value} \geq a$ şartı sağlanmadığı için frekans testi başarısız kabul edilir. Şekil 7' de verilen sonuçlar incelendiğinde, test edilen sayı dizilerinde kümülatif farkın ve dolayısıyla biasın, kümülatif fark için hesaplanan sınır değerinin altında meydana geldiği görülebilir. Dolayısıyla test sonuçları başarılıdır ve aynı sonuçlar için test edilen sayı dizilerinde biasın, rasgelelik dağılımını bozmayacak şekilde kontrollü bir biçimde meydana geldiği söylenebilir.

Otokorelasyon Analizi

İkinci aşamada ise test edilen rasgele sayı dizilerinde ardışık gözlemler arasındaki belirgin bir doğrusal ilişkinin var olup olmadığını tespit etmek için otokorelasyon testi uygulanmıştır. Aynı zamanda biasın varlığına da işaret eden rasgele sayılar arasındaki güçlü bir ilişkinin varlığı, bu sayılar için rasgelelik varsayımının ihlal edildiğini ve tahmin edilebileceği anlamına gelir. Çalışma içerisinde rasgele sayı dizilerinin kendi içerisinde herhangi bir istatistiksel bağımlılık içermediğini göstermek için matematiksel tanımı Denklem 9 ve 10' da verilen otokorelasyon testi kullanılmıştır. Test tekniği herhangi $x_0, x_1, x_2, \dots, x_{n-1}$ rasgele sayı dizisi ile bu dizinin $1 \leq d \leq [n/2]$ aralığındaki farklı d tamsayıları için kaydırılmasıyla elde edilmiş alt dizileri (döngüsel olmayan) arasındaki otokorelasyon katsayısını (X_5) hesaplar. Denklem 9' da \oplus işareti XOR işlemini temsil etmektedir [19].

$$A(d) = \sum_{i=0}^{n-d-1} b_i \oplus b_{i+d} \quad (9)$$

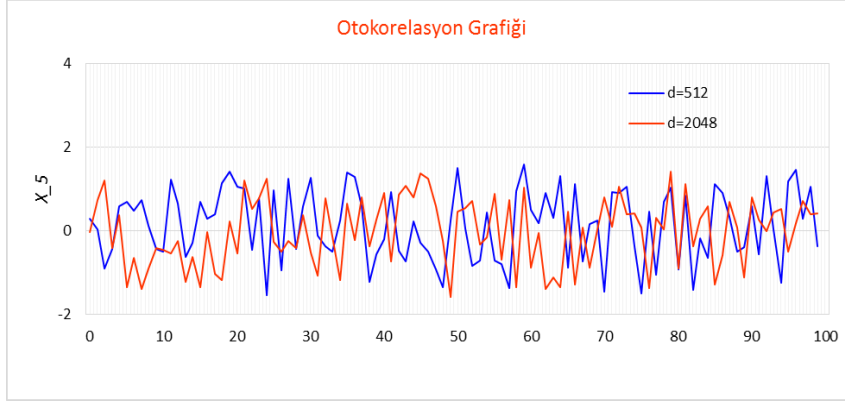
$$X_5 = \frac{2[A(d) - (n-d)/2]}{\sqrt{(n-d)}} \quad (10)$$

Eşitlikte Z_0 , ortalaması (μ) 0 ve varyansı (σ^2) 1 olan ve genel karakteristiği standart dağılımla aynı olan rasgele değişkenin olasılık yoğunluk fonksiyonudur. a önem derecesi olmak üzere, $Z_{a/2}$ değerleri Z standart normal dağılım tablosu üzerinde yer almaktadır. Test tekniği uygulanırken H_0 hipotezinin reddedilme olasılığını temsil eden anlamlılık a değerleri sırasıyla 0.1 ve 0.05 olarak seçilmiştir. Her iki a değeri için H_0 hipotezinin reddedilmeme olasılığı diğer bir deyişle testin önem derecesi sırasıyla %90 ($1 - a = 0.9$) ve %95 ($1 - a = 0.95$)' tir. $a = 0.1$ ve $a = 0.05$ için Z tablosu üzerinde tanımlı test istatistiğini temsil eden eşik değerler ($Z_{a/2}$) sırasıyla 1.649 ve 1.96' dır. Bu değerler, Z tablosunda $Z_{a/2}$ ' ye karşılık gelen satır ve sütun değerlerinin toplamı alınarak bulunur. Örneğin bazı önem dereceleri için standart Z tablosundan elde edilmiş sınır değerler, Tablo 4' te verilmiştir.

Bir hilesiz bozuk paranın havaya atılmasıyla tura yüzü için '0', yazı için ise '1' üretildiği 100 bitlik bir gerçek rasgele sayı dizisini ele alalım. Gerçek rasgele olayların çoğu zaman

Tablo 4. Farklı a değerleri için Z tablosu üzerinde tanımlı X_5 değerleri

a	0.1 (%90)	0.05 (%95)	0.025 (%97,5)	0.01 (% 99)	0.005 (%99.5)
X_5	1.6449	1.9600	2.24	2.575	2.81



Şekil 8. Test edilen rasgele sayı dizileri için otokorelasyon test sonuçları

düşük seviyeli rasgelelik içermesinin bir sonucu olarak, sayı dizisinin ilk 99 biti '0' olarak meydana gelse bile, sonraki üretilen bit değerinin '1' veya '0' olma ihtimali yine 1/2 olmalıdır. Bu varsayım, ancak ve ancak herhangi bir andaki paranın havaya atılması olayının, bir önceki veya bir sonraki olayın sonucu üzerinde etkisinin olmamasıyla mümkündür. Yani havaya atılan paranın sonuçlarının bir seri halinde tura gelmiş olması gerçeği, bir sonraki atışta tekrar tura geleceği sonucunu olası kılmamalıdır. Otokorelasyon, olaylar arasında istatistiksel bağımsızlık olarak da anlaşılan bu etkinin varlığını ve yönünü matematiksel olarak belirlemeye yarayan bir test yöntemidir [20].

$d = 512$ ve $d = 2048$ kaydırma değerleri için rasgele sayı dizilerinin otokorelasyon test sonuçları Şekil 8' de verilmiştir. Test tekniğinde rasgele sayılar için bağımsızlık varsayımının yapılabilmesi için $0 \leq X_5 \leq Z_{a/2}$ şartının yerine gelmesi gerekir. Dolayısıyla her iki önem derecesinde test edilen sayı dizilerinde bağımsızlık varsayımını doğrulamak için korelasyon katsayısı, sırasıyla $-1.6449 \leq X_5 \leq 1.6449$ ve $-1.96 \leq X_5 \leq 1.96$ aralığında olmalıdır.

Şekil 8' de verilen sonuçları incelendiğinde her iki önem derecesi için test sonuçlarının otokorelasyon testi açısından kabul edilebilir sınır değerler içerisinde bulunduğu görülmektedir. Test tekniğinin başarılı kabul edildiği bu durumda dizi elemanları arasındaki bağıntıyı düzgün bir şekilde tanımlayan lineer bir modelin bulunmadığı söylenebilir. Özetle test edilen sayı dizilerinin kendi içerisinde tahmin edilebilirliğe yol açan herhangi bir istatistiksel bağımlılık içermediği ve GRSÜ' nin bu sayı dizilerini sırasıyla %90 ve %95 güven aralığında bağımsız olarak ürettiği söylenebilir.

Ki-kare İyi Uyum Analizi

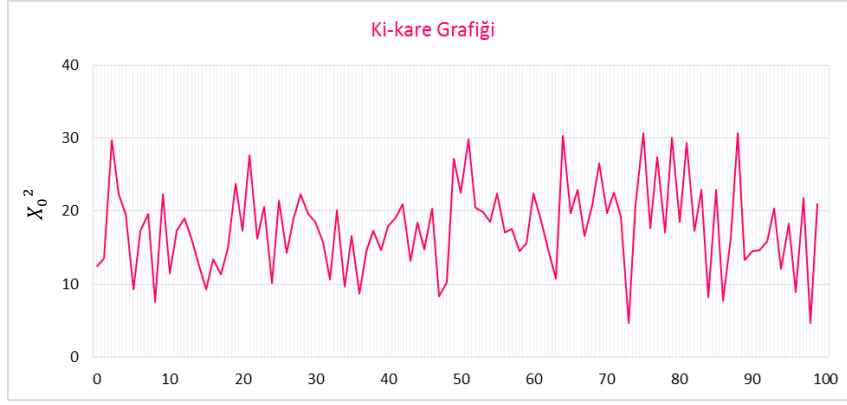
Çalışma içerisinde rasgele sayı dizilerinin ideal istatistiksel dağılıma teorik olarak uyup uymadığını tespit edebilmek için ki-kare uyum testi kullanılmıştır. Ki-kare uyum testinin matematiksel tanımı Denklem 11' de verilmiştir. Denklemde k sınıf/grup sayısıdır. O_i ve E_i sırasıyla i . sınıf için gözlemlenen beklenen frekans değerleridir. Uyum testi, sayı dizisinde alt sınıflara ayrılmış rasgele değişkenlerin beklenen

ve gözlemlenen frekansları arasındaki farkın anlamlı olup olmadığı temeline dayanır. Dolayısıyla boyutu n olan ideal bir rasgele sayı dizisinde her bir grubun bu dizi içerisinde beklenen frekans dağılımı n/k olmalıdır. Bir dağılım içerisinde her bir sınıf ($1, \dots, k$) için gözlemlenen ve beklenen frekans değerleri arasındaki farkın kareleri toplamı, ki-kare (X_0^2) test istatistiğidir. Test istatistiğinin dağılımı aynı zamanda $k - 1$ serbestlik derecesi ile karakterize edilen ki-kare dağılımıdır. Test sonuçları rasgele sayıların düzgün bir dağılımı olup olmadığına ve bu sayıların istatistiksel açıdan rasgele olup olmadığına karar verebilmek için yeterli kanıt sunabilmektedir [13], [24].

$$X_0^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} < X_{[a,k-1]}^2 \quad (11)$$

Denklem 11' deki eşitlikten yola çıkarak test istatistiğinin ki-kare dağılımı göstermesi için k ile temsil edilen sınıf sayısı, 5' ten büyük olmalıdır. Bu nedenle test sonuçlarının güvenilirliği için teste tabi bit düzeyindeki rasgele sayı dizileri kendi içerisinde 4 bitlik ardışıl olarak gruplanarak heksadesimal (hexadecimal) seviyeye dönüştürülmüştür. Dolayısıyla Denklem 11' de k grup sayısı 16' dir. Test edilen sayı dizilerinin heksadesimal seviyeye dönüştürülmesiyle beraber her biri 524.288 bitten oluşan sayı dizilerinin boyutu 131.072 (524.288/4)' ye indirgenmiştir. Bu tanımlı aralıktaki sayı dizilerinde heksadesimal olarak temsil edilen her bir sınıfın beklenen frekans değeri 8.192 (131.072/16) dir. $a = 0.01$ ve $a = 0.005$ önem derecesi için test edilen 100 farklı rasgele sayı dizisinin ki-kare salımları Şekil 9' daki gibidir. Ayrıca $k - 1$ serbestlik derecesinde farklı a değerlerine karşılık gelen ki-kare (X_0^2) dağılımı ve test edilen üç farklı sayı dizisinin frekansları sırasıyla Tablo 5 ve 6' da verilmiştir.

Tablo 5' te $k - 1$ serbestlik derecesi için $a=0.01$ ve $a = 0.005$ önem derecelerine karşılık standart ki-kare dağılım tablosundan elde edilmiş $X_{[a,k-1]}^2$ sınır değerleri sırasıyla 30.578 ve 32.801' dir. Test tekniğinin başarımı için rasgele sayı dizileri için hesaplanan ki-kare test istatistiğinin



Şekil 9. Rasgele sayılar için ki-kare testi sonuçları

bu sınır değerlerin altında salınım göstermesi, diğer bir deyişle $X_0^2 < X_{[a,k-1]}^2$ şartının yerine gelmesi gerekir. Şekil 9’ da verilen sonuçlar incelendiğinde, test edilen sayı dizileri için hesaplanan ki-kare istatistiğinin sınır değerlerin altında salınım gösterdiği görülmektedir. Aynı sonuçlar test edilen sayı dizilerinde gözlemlenen frekans değerleri ile beklenen frekans değerleri arasında, olasılık dağılımına uyum açısından bir tutarlılığın olduğunu göstermektedir. Bu durumda sayı dizilerinin tanımlı aralık içerisinde düzgün dağılımla oluştuğu ve bu sayıların rasgelelik hipotezi kabul edilir veya en azından reddedilmemiş olur.

Tablo 5. $k - 1$ için farklı a değerleri için X_0^2 değerleri

SD	Olasılık (a)					
	0.90	0.10	0.05	0.025	0.01	0.005
15	8.574	22.307	24.996	27.488	30.578	32.801

Tablo 6. Üç farklı rasgele seçilmiş sayı dizisinin frekansları

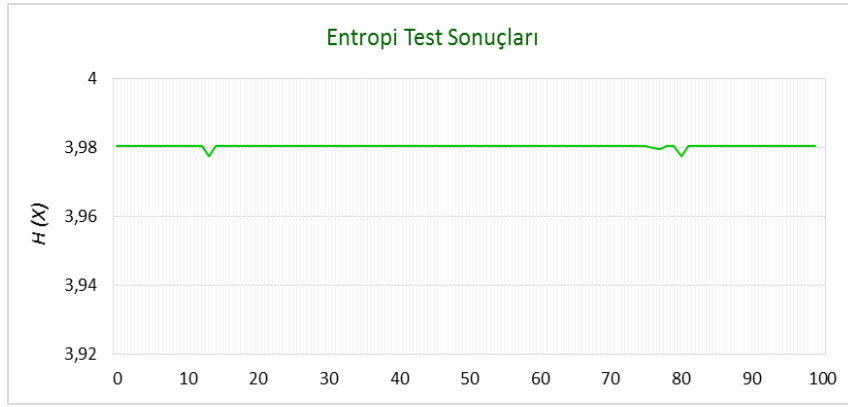
Hex	E_i	Örnek 1	Örnek 2	Örnek 3
		(6. test dosyası)	(37. test dosyası)	(99. test dosyası)
		O_i	O_i	O_i
0		8069	8103	8185
1		8193	8101	8189
2		8250	8197	8191
3		8320	8161	8240
4		8138	8220	8143
5		8188	8294	8262
6		8258	8184	8131
7	8192	8238	8153	8134
8		8194	8142	8111
9		8248	8151	8273
A		8087	8313	8210
B		8150	8171	8129
C		8283	8256	8192
D		8152	8239	8218
E	8192	8283	8222	
F		8112	8104	8242

Entropi Testi

Entropi ile ilgili farklı kavramsal ve matematiksel tanımlamalar olmasına rağmen en genel tanım Claude Elwood Shannon tarafından yapılmıştır. Matematiksel tanımı Denklem 1’ de verilen entropi, bilgi teorisinde bir rasgele değişkenin tahmin edilemezlik ölçüsü olarak kabul edilir. Denklem 1’ de $p(x_i)$, $X[n] = x_0x_1x_2 \dots x_{n-1}$ $x \in \{0,1\}$ olmak üzere dizideki x_i . rasgele değişkenin oluşma olasılığını temsil etmektedir. Rasgele sayı dizisi içerisindeki her bir elemanın oluşma olasılığının eşit olduğu durumun teorik sonucu olarak entropi maksimum değerini alır yani 1’ e eşit olur. Belirsizliğin olmadığı, çıkışların kesin ve bilinen olduğu durumlar için ise entropi minimumdur yani 0’ dır. Rasgele sayıların tahmin edilemezliğini teorik olarak garanti edebilmek için, $X[n]$ şeklindeki n -bitlik rastgele bir vektörün entropisi, mümkün olduğunca n ’ e yakın olmalıdır [12], [15].

Düzenli dağılımla ve her bir elemanın bağımsız üretildiği bir rasgele sayı dizisinde bir bitin oluşma olasılığı $1/2$ ’ dir. “00”, “01”, “10”, “11” şeklinde iki bitlik kodlanmış bir dizide art arda herhangi iki bitin üretilme olasılığı ise $1/4$ ’ tür. Çünkü bağımsız iki olayın gerçekleşme olasılığı, bu olayların kendi olasılıklarının çarpımına eşittir. Dolayısıyla bağımsız ve düzenli dağılımla oluşmuş n bitlik bir rasgele sayı dizisinin doğru tahmin edilmesi olasılığı, toplamda $\frac{1}{2^n}$ ’ ye eşit veya yakın olmalıdır. Her bir bit için oluşma olasılığı eşit durumların olası sonuçları ve taşıdığı bilgi miktarı da göz önünde bulundurulduğunda sayı dizisinin entropisi de n ’ yakını veya eşit olduğu görülebilir. Saldırganın her bir bitin olası sonuçlarını tahmini için eşit derecede zorlukla karşılaştığı bu durumda, belirsizlik yani entropi maksimumdur. Bu durumdaki bir sayı dizisinde, bu diziyi oluşturan öncül veya ardıl bitlerin $1/2$ ’ den daha yüksek bir olasılıkla tahmin edilmemesini matematiksel olarak garanti etmiş oluruz. Test edilen rasgele sayı dizileri için entropi testi sonuçları, Şekil 10’ daki gibidir.

Herhangi bir rasgele değişkenin belirsizliğini matematiksel olarak ölçülebilen entropi, değişkenin/bilginin kodlama yöntemiyle doğrudan ilgilidir. Şekil 10’ da verilen test sonuçları için heksadesimal olarak dönüştürülmüş rasgele sayı dizileri kullanılmıştır. Dolayısıyla test edilen heksadesimal seviyedeki sayı dizilerinde maksimum entropi



Şekil 10. Test edilen sayı dizileri için entropi dağılımı

değeri, bu dizileri oluşturan 0-15 arasındaki her bir sayı başına 4 bittir. Entropinin maksimum değere ulaşabilmesi ancak rasgele olduğu varsayılan olay ya da değişkenlerin tanımlı bir aralıkta eşit oluşma olasılığıyla mümkündür. Bu olasılığın; değişkenin belirli çıkışları üzerinde yoğunlaştığı veya eşit oluşmadığı düşük olasılıklı durumlar, tahmin edilebilirlik açısından daha fazla bilgi içerirler. Oysaki, bağımsızlık ve eşit oluşma olasılığı gibi iyi istatistiksel özelliklerine ek olarak rasgele sayı dizilerinin entropisinin yüksek olması istenir. Dolayısıyla bu gibi durumlarda entropi düşüktür. Şekil 10' da verilen test sonuçları incelendiğinde test edilen sayı dizileri için entropinin maksimum değere yakın bir dağılım (spektrum) sergilediği görülmektedir. İdeal değere yakın entropi sonuçları test edilen rasgele dizilerinin düzgün bir dağılımla oluştuğunu ve sayı dizisinde bit başına entropinin yüksek olduğunu doğrulamaktadır. Entropi sonuçları, bu yönüyle Şekil 9' da verilen ki-kare test sonuçlarıyla da uyumludur. İyi istatistiksel özelliklerine ek olarak test edilen rasgele sayılar için entropinin yüksek olması bu sayıların kriptanaliz senaryolarına karşı dirençli olduğu çıkarımı yapılabilir.

Dieharder İstatistiki Rasgelelik Analizi

Rasgele sayı dizilerinin olasılıksal özelliklerinin tanımlanabilmesine imkan tanıyan istatistiksel analize dayalı farklı test paketleri bulunmaktadır. Bu test paketlerinden biri olan Dieharder [24] testi, diğer test yöntemlerinde olduğu gibi sayı dizilerinin ampirik dağılımlarını analiz ederek, bu dizilerin rasgele olmadığına işaret eden örüntüleri tarar. NIST SP 800-22 [25] test paketinde yer alan test tekniklerinin bir bölümünü içeren Dieharder testi, Tablo 7' de yer alan 31 farklı alt test grubunu içermektedir. RSÜ' lerin geniş bir yelpazede değerlendirilmesine olanak sağlayan bu durum, aynı zamanda test çeşitliliği açısından üreticinin birçok yönünü analiz edebilecek kapsamlı bir bakış açısı sunabilmektedir.

Test metodolojisinde her bir kriter için rasgele sayı dizileri için test istatistiği olarak da kabul edilen $p - değer$ parametresi hesaplanır. Bu parametre aynı zamanda, rasgelelik açısından H_0 hipotezinin doğru olduğu varsayımına karşı olan kanıtların nicel bir ölçüsüdür. Farklı dağılım ölçütlerinin dikkate alındığı test kriterleri

için spesifik olarak $p - value$ değerleri hesaplanabilmektedir. Ancak genel olarak rasgele sayılar için hesaplanan test istatistiğinin rasgelelik varsayımı altındaki beklenen dağılımla karşılaştırılması esas alınır. Test edilen sayı dizilerinin Dieharder testlerini geçebilmesi için p -değer parametresinin $[0 + a/2, 1 - a/2]$ aralığında olması gerekir. Diğer bir deyişle $a = 0.01$ önem derecesi için her bir test kriterinde $0.005 \leq p - değer \leq 0.995$ şartı sağlanmalıdır. Test edilen örnek bir rasgele sayı dizisi için Dieharder test sonuçları Tablo 7' deki gibidir. Çalışma kapsamında test edilen sayı dizilerinin tamamı, Dieharder testlerini başarıyla geçmiştir.

Tablo 7. Rasgele sayılar için Dieharder test sonuçları

Test Adı	$p - değeri$	Sonuç
1 diehard birthdays test	0.73858321	Geçti
2 diehard perm5 test	0.12481644	Geçti
3 diehard 32x32 binary rank test	0.01401876	Geçti
4 diehard 6x8 binary rank test	0.25343627	Geçti
5 diehard bit stream test	0.64233008	Geçti
6 diehard opso test	0.81128183	Geçti
7 diehard oqso test	0.42451618	Geçti
8 diehard dna test	0.72141254	Geçti
9 diehard count the 1s (stream)	0.97591478	Geçti
10 diehard count the 1s test (byte)	0.92267082	Geçti
11 diehard parking lot test	0.96749733	Geçti
12 diehard min. distance (2d circle) test	0.97488440	Geçti
13 diehard 3d sphere (min. distance)	0.62540617	Geçti
14 diehard squeeze test	0.92231336	Geçti
15 diehard sums test	0.35664329	Geçti
16 diehard runs test	0.23238026	Geçti
17 diehard craps test	0.38974780	Geçti
18 marsaglia and tsang gcd test	0.49064950	Geçti
19 sts monobit test	0.77660845	Geçti
20 sts runs test	0.91894503	Geçti
21 sts serial test (generalized)	0.98904112	Geçti
22 rgb bit distribution test	0.83630253	Geçti
23 rgb generalized min. distance test	0.70698375	Geçti
24 rgb permutations test	0.81118202	Geçti
25 rgb lagged sum test	0.94342790	Geçti
26 rgb kolmogorov-smirnov test	0.32679982	Geçti
27 dab byte distribution test	0.38705684	Geçti
28 dab discrete cosine transform test	0.83667580	Geçti
29 dab fill tree test	0.43147552	Geçti
30 dab fill tree 2 test	0.28552909	Geçti
31 dab fill monobit 2 test	0.87813217	Geçti

Çalışmanın bu bölümünde kriptografik rasgeleliğin değerlendirilmesi amacıyla ele alınan bağımsız testler ile bu testlere ait sonuçların, literatürde yaygın kabul görmüş test gruplarının sonuçlarıyla uyumluluğu analiz edilmiştir. Test istatistikleri için farklı dağılım ve metrik değerlerin dikkate alındığı bağımsız testlerin sonuçları, Tablo 7’deki Dieharder test paketine ait sonuçlar ile uyumlu ve anlamlı benzerlikler göstermektedir. Bu tutarlı durumun bir sonucu olarak çalışma içerisinde tercih edilen bağımsız test teknikleriyle pratikte güvenilir ve geçerli sonuçların elde edilebilirliğini doğrulamaktadır. Standart test paketlerine ek olarak bağımsız test stratejilerinin özel senaryoların test edilebilmesi, rasgeleliğin anlaşılabilirliği, uygulama bağımsızlığı ve özelleştirilebilirlik gibi özellikleri rasgelelik açısından daha geniş kapsamlı bir değerlendirme yapılmasına olanak sağlar.

Standart Sapma ve Gerçek Rasgelelik Analizi

Herhangi bir GRSÜ’ nin temel güvenlik değerlendirmesi, R1 ve R2 gereksinimleri ile karakterize edilmiştir. R1 gereksinimi kapsamında; sınırsız hesaplama kaynağına sahip olsa bile saldırganların rasgele sayıları tahmin etmek için başvurabileceği en iyi yöntem kaba kuvvet olmalıdır. Rasgele sayıların tahmini için tüm olası kombinasyonların denenmesini zorunlu kılan bu saldırıları etkisiz kılabilmek için GRSÜ’ nin iyi istatistiksel özelliklere sahip olması şarttır. Fakat GRSÜ’ lerin zayıf istatistiksel özellikleri, kriptografik amaçlar için kullanımını sınırlayan önemli bir faktördür. Bu durumun üstesinden gelmek ve GRSÜ’ leri kriptografik açıdan güçlü kılmak için son işlem teknikleri kullanılmaktadır. Bu kapsamda çalışma içerisinde rasgelelik analizi için tercih edilen ve detayları Bölüm 2.1’de verilen GRSÜ mimarisinde son işlem aşamasında sürekli ve ayrık zamanlı kaos tabanlı s-box’ lar kullanılmıştır. Zira bu bölümde sunulan bağımsız test teknikleri kullanılarak elde edilen istatistiksel analiz sonuçları GRSÜ mimarisinin R1 gereksinimini başarıyla yerine getirdiğini doğrulamaktadır.

İstatistiksel test tekniklerinin (entropi testi de dahil olmak üzere) rasgele değişkenlerin gözleme dayalı sonuçlarına uygulanması, güvenilirlik açısından yanıltıcı sonuçların elde edilmesine neden olabilir. Zira bu yöntemlerle test edilecek sayı dizilerinin basit yazılımsal yöntemlerle üretilmesi de mümkündür. Dolayısıyla istatistiksel testler rasgele sayıların elde edilme yöntemleri, diğer bir deyişle kaynağın güvenilirliği konusunda geçerli kanıtlar sunmazlar. İstatistiksel test sonuçlarından yola çıkarak bu sayı dizilerinin kriptografik açıdan güvenilir bir kaynaktan elde edilip edilmediği hakkında yorum yapmak mümkün değildir. Oysaki kriptografik uygulamaların temel güvenlik varsayımı, kullanılan rasgele sayıların istatistiksel özelliklerinin yanı sıra bu sayıların fiziksel bir gerçekliğe bağlı olarak üretilmesi ile de güçlü bir şekilde ilişkilidir [7],[9]-[10].

Fiziksel gerçekliğe dayalı bir kaynaktan beslenen GRSÜ’ ler, tahmin edilemezlik açısından istatistiksel rasgelelik testlerinden daha güçlü özelliklere sahip olabilirler. Öyle ki, bu üreteçlerin tek yönlü bir fonksiyon gibi çalışmasını

sağlayan gürültü kaynaklarının stokastik davranışı, tahmin edilemezlik açısından R2 ve bu gereksinimle bağlantılı R3 ve R4 gereksinimlerini tek başına yerine getirebilmektedir. Gürültü kaynaklarının non-deterministiklik sağlayan bu özelliği, GRSÜ’ lerde istatistiksel rasgeleliğin, yani R1 gereksiniminin önemli bir tamamlayıcı özelliğidir. Dolayısıyla bu üreteçlerde gürültü kaynağının non-deterministik davranışının matematiksel araçlarla modellenmesi, üreticinin ve rasgele sayıların güvenilirliği açısından önemlidir. Çalışmanın bu bölümünde kullanılan GRSÜ’ nin ve rasgele sayıların R2 gereksinimiyle bağlantılı tahmin edilemezlik özelliklerini, entropi varsayımı açısından doğrulamak için standart sapma analizi kullanılmıştır.

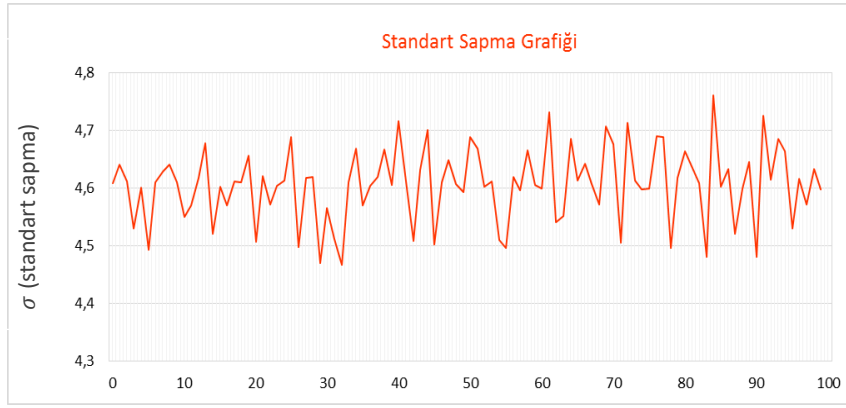
Standart sapma analizi için ihtiyaç duyulan sayı dizileri, [13]’teki GRSÜ mimarisinin aynı başlangıç şartlarında 100 defa yeniden başlatılmasıyla elde edilmiştir. Heksadesimal seviyeye dönüştürülen bu bölümdeki sayı dizilerinin tamamı, doğrudan gürültü kaynağından elde edilmiş saf gerçek rasgele (son işlem uygulanmamış) çıkışlardan oluşur. Bu sayı dizilerinin standart sapma (σ) değerleri Denklem 12’deki gibi hesaplanmıştır. $p(x_i)$, saf rasgele sayı dizisi içerisinde x_i elamanın oluşma olasılığı olmak üzere varyans (Var) ve rasgele değişkenlerin ağırlıklı toplamlarını temsil eden $E(X)$ değerleri ise sırasıyla Denklem 13 ve 14’teki gibi hesaplanmıştır. Test edilen sayı dizileri için hesaplanan standart sapma değerlerinin değişimi Şekil 11’deki gibidir.

$$\sigma = \sqrt{Var(X)} \quad (12)$$

$$Var(X) = \sum_{i=1}^k [x_i - E(X)]^2 \cdot p(x_i) \quad (13)$$

$$\mu = E(X) = \sum_{i=1}^k x_i \cdot p(x_i) \quad (14)$$

Tohum gibi başlangıç girdilerine ihtiyaç duyan deterministik RSÜ’ ler aynı zamanda tipik matematiksel bir bağıntıdır. Deterministikliğin doğası gereği bu üreteçler başlangıç şartları farklı olsa da aynı başlangıç girdileri için çıkışında hep aynı sayı dizilerini üretirler. Bu durumda, Denklem 12-14’teki bağıntıya göre test edilecek sayı dizilerinin hepsi aynı standart sapma değeriyle oluşması kaçınılmazdır. Fakat her bir rasgele sayı dizisinin farklı bir standart sapma değeriyle oluştuğunu gösteren Şekil 11’deki sonuçlar, test edilen rasgele sayı dizilerinin kriptografik açıdan güvenilir bir kaynaktan elde edildiğini doğrular niteliktedir. Özellikle GRSÜ’ nin tek yönlü bir fonksiyon gibi davranmasını sağlayan gürültü kaynağının non-deterministik (gerçek rasgele) davranışı, test edilen sayı dizilerinin farklı standart sapma değerleriyle oluşması noktasında belirleyici bir etkiye sahiptir. Kaynağın bu davranışı, aynı zamanda test edilen rasgele sayı dizileri için R2 ile bağlantılı tekrar üretilmezlik ve tahmin edilemezlik gibi önemli bir karakteristik gereksinimin yerine getirdiğini göstermektedir.



Şekil 11. Test edilen saf rasgele sayı dizilerinin standart sapma dağılımı. Test aşamasında sayı dizilerinin fiziksel bir gerçeklikten elde edildiğini doğrulamak için doğrudan gürültü kaynağından örneklenmiş saf (son işlem uygulanmamış) halleri kullanılmıştır.

Sonuç Ve Öneriler

Rasgele sayı dizileri, katı güvenlik gereksinimlerine ihtiyaç duyan günümüz modern kriptografik protokollerinin önemli girdileridir. Dolayısıyla bu sayıların güvenle bağlantılı temel gereksinimleri göz ardı edilemez. Bu gereksinimler doğrultusunda rasgele sayılar iyi istatistiksel yeterliliklerinin yanı sıra, tahmin edilemez ve tekrar üretilemez olması istenir. Bu nedenle kriptografik rasgelelik kavramının iyi anlaşılması ve nicel istatistiksel yöntem ve araçlarla doğru analiz edilmelidir. Çünkü bu protokollerin temel güvenlik varsayımı kullanılan rasgele sayıların istatistiki kalitesi ve tahmin edilemezlik özellikleri ile doğrudan bağlantılıdır.

En genel tanımıyla kriptografide gerçek rasgelelik, güvenilir şekilde yeniden üretilemeyen, birbirinden bağımsız, düzgün dağılımla oluşmuş ve tahmin edilemez değerler üreten olasılıklı bir sürecin sonucunu ifade eden önemli bir metrik kavramdır. Bu kavramın/sürecin doğru anlaşılması ve yorumlanması noktasında olasılık teorisi ve istatistik, güçlü ve kullanışlı bir dizi araç ve yöntem sunmaktadır. Literatürde rasgelelik değerlendirilmesiyle ilgili güçlü argümanlar sunabilen hipotez tabanlı test yöntemleri bulunmaktadır. Tek başına yeterli olmamakla birlikte bu testler RSÜ'lerin başlangıç değerlendirmesinde önemli bir yere sahiptir. RSÜ'ler açısından tahmin edilemezlik önemli bir güvenlik gereksinimidir. Özellikle GRSÜ'ler için literatürde yaygın kullanılan test paketleri, bu temel gereksinim ile alakalı kapsamlı bir değerlendirme yapmazlar. Dolayısıyla testlerin yanı sıra bu üreteçlerde entropi analiziyle birlikte, fiziksel gerçekliğe dayalı stokastik analizin yapılması daha geçerli sonuçların elde edilmesini sağlayacaktır.

Çalışma kapsamında kriptografik RSÜ'ler için rasgelelik kavramı ve bu kavramla bağlantılı istatistiki gereksinimlerin doğrulanması için bazı bağımsız test yöntemlerine yer verilmiştir. Bu testler aynı zamanda,

FPGA tabanlı bir GRSÜ' den gerçek zamanlı olarak elde edilmiş sayı dizilerine uygulanmıştır. Rasgeleliğin derinlemesine ve çok yönlü bir bakış açısıyla analizi için bu testlerin uygulanma biçimleri ve görece dağılımları, doğrudan kriptografik gereksinimler özelinde incelenmiştir. Klasik paradigmayı aşmayı sağlayan bağımsız yöntemler, bilindik test paketleriyle benzer derecede geçerli sonuçlar sağlayarak, rasgelelik analizinde daha geniş bir bakış açısı ve kapsamlı bir değerlendirme imkanı sağlamaktadır. Çalışma bu yönüyle, rasgelelik kavramının daha derinlemesine anlaşılmasına katkı sağlarken, güvenlik protokollerinin ve kriptografik RSÜ'lerin tasarımında sağlam bir temel oluşturabilecek farklı bir metodoloji önermektedir. Çalışma bir diğer yönüyle, kriptografik düzlemde yapılacak akademik çalışmalara ve uygulayıcılara fikir ve uygulama bazında kaynaklık edeceğine inanmaktayız. Gelecek çalışmalarımızda sunulan test yöntemlerinin farklı alternatif test yöntemlerini de kapsayacak genişletilmesini ve bir web platformu üzerinden kullanıcılara sunulduğu gelişmiş bir test platformunun hayata geçirilmesini amaçlamaktayız.

KAYNAKLAR

- [1]. C. K. Koc, *Cryptographic Engineering*, Springer, Signals and Communication Theory, Berlin. DOI: 10.1007/978-0-387-71817-0_2, 2009.
- [2]. A. M. Garipcan, E. Erdem, "Hardware implementation of chaotic zigzag map based bitwise dynamical PRNG on FPGA", *Informacije MIDE M*, vol. 50(4), pp. 243-254, 2020
- [3]. I. Cicek, A. E. Pusane, G. Düндür, "Random number generation using field programmable analog array implementation of logistic map", *In 2013 21st Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)* (pp. 1-4). IEEE, 2013
- [4]. G.C. Bilginer, "Kriptoloji", *Tubitak Bilim ve Teknik Dergisi*, cilt 55(658), ss. 16-3, 2022.

- [5]. F. Özkaynak, “Kriptolojik Rasgele Sayı Üreteçleri”, *Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi*, cilt 8(2), ss. 37-45, 2015
- [6]. K. Marton, A. Suci, I. Ignat, “Randomness in digital cryptography: A survey”, *Rom. J. Inf. Sci. Technol.*, vol. 13(3), pp. 219-240, 2010
- [7]. V. Fischer, M. Deutschmann, S. Lattacher, ..., G. Battum, “Report on Selected TRNG and PUF Principles”, *HECTOR Project Technical Report D2.1, UJM* (Université Jean Monnet), 2016
- [8]. A. J. Acosta, T. Addabbo, E. Tena-Sánchez, “Embedded electronic circuits for cryptography, hardware security and true random number generation: an overview”, *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 45(2), pp. 145-169, 2017
- [9]. W. Schindler, W. Killmann, “Evaluation criteria for true (physical) random number generators used in cryptographic applications” *In International Workshop on Cryptographic Hardware and Embedded Systems* (pp. 431-449). Springer, Berlin, Heidelberg, 2022
- [10]. K. Wold, Security properties of a class of true random number generators in programmable logic. PhD Thesis, Faculty of Computer Science and Media Technology, Gjøvik University College, 2011
- [11]. E. Avaroğlu, T. Tuncer, A. B. Özer, B. Ergen, M. Türk, “A novel chaos-based post-processing for TRNG” *Nonlinear Dynamics*, vol. 81(1), pp. 189-199, 2015
- [12]. H. Demirhan, N. Bitirim, “Statistical testing of cryptographic randomness” *İstatistikçiler Dergisi: İstatistik ve Aktüerya*, cilt 9(1), ss. 1-11, 2016
- [13]. A. M. Garipcan, E. Erdem, “A gigabit TRNG with novel lightweight post-processing method for cryptographic applications” *The European Physical Journal Plus*, vol.137(4), pp. 1-26, 2022
- [14]. I. Vattulainen, “New tests of random numbers for simulations in physical systems” arXiv preprint cond-mat/9411062, 1994
- [15]. O. Bahadır, H. Türkmençalıkoğlu, “Bilgi Kuramında Shannon Entropisi ve Uygulamaları”, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, cilt (32), ss. 491-497, 2021
- [16]. O. Kocak, F. Sulak, A. Doğanaksoy, U.G.U.Z Muhiddin, “Modifications of Knuth randomness tests for integer and binary sequences” *Communications Faculty of Sciences University of Ankara Series A1 Mathematics and Statistics*, vol. 67(2), pp. 64-81, 2018
- [17]. M. Bar-Hillel, W. A. Wagenaar, “The perception of randomness”, *Advances in applied mathematics*, vol. 12(4), pp. 428-454, 1991
- [18]. A. M. Garipcan, E. Erdem, “Design, FPGA implementation and statistical analysis of a high-speed and low-area TRNG based on an AES s-box post-processing technique” *ISA transactions*, vol. 117, pp. 160-171, 2021
- [19]. A. J. Menezes, P.C. Van Oorschot, S. A. Vanstone, “Handbook of applied cryptography”, CRC press, 2018
- [20]. C. Wheelan, “Çıplak İstatistik”, Buzdağı Yayınevi, Eryaman-Ankara, 2022
- [21]. L. F. Rojas-Muñoz, S. Sánchez-Solano, M. C. Martínez-Rodríguez, P. Brox, “True Random Number Generation Capability of a Ring Oscillator PUF for Reconfigurable Devices” *Electronics*, vol. 11(23), 4028, 2022
- [22]. F. Özkaynak, “Construction of robust substitution boxes based on chaotic systems” *Neural Computing and Applications*, vol. 31(8), pp. 3317-3326, 2019.
- [23]. F. Ozkaynak, F. “A novel random number generator based on fractional order chaotic Chua system”, *Elektronika ir Elektrotehnika*, vol. 26(1), pp. 52-57, 2020
- [24]. R. G. Brown, D. Eddelbuettel, D. Bauer, “Dieharder” Duke University Physics Department Durham, NC, 27708-0305, 2018
- [25]. L. E. Bassham, A. L. Rukhin, J. Soto, J. R. Nechvatal, M. E. Smid, E. B. Barker, ... S. Vo, “Sp 800-22 rev. 1a. a statistical test suite for random and pseudorandom number generators for cryptographic applications” National Institute of Standards and Technology, 2010

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Ayrıca hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yazar Katkıları

Yazarlar makaleye eşit derecede katkıda bulunmuştur.

Teşekkür

Yazarlar, değerlendirme sürecinde bilgi birikimleri ve yapıcı geri bildirimleriyle makalenin bilimsel kalitesinin iyileştirilmesine, katkıda bulunan anonim değerlendirecilere ve editörlere içtenlikle teşekkür eder.



Çoklu bulut teknolojisi yönetimi için web tabanlı bir araç tasarımı ve geliştirilmesi

*Design and development of a web-based tool for multi-cloud technology*Hacer ÖZYURT^{1,*}, Yusuf Can AKIER², Özcan ÖZYURT³¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Of Teknoloji Fakültesi, Yazılım Mühendisliği, hacerozyurt@ktu.edu.trORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8621-2335>²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Of Teknoloji Fakültesi, Yazılım Mühendisliği, yusufcanakier@outlook.comORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9926-268X>³Karadeniz Teknik Üniversitesi, Of Teknoloji Fakültesi, Yazılım Mühendisliği, oozyurt@ktu.edu.trORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0047-6813>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 3 Kasım 2023
Revizyon 6 Ocak 2024
Kabul 3 Şubat 2024
Online 29 Mart 2024

Anahtar Kelimeler:

Container yönetimi, Çoklu bulut tabanlı mimari, Hizmet olarak yazılım, Kubernetes

ÖZ

Yazılım hizmeti sağlayıcıları, değişen ve gelişen teknoloji araçlarını takip etmekten ve geliştirici envanterlerini güncel tutmaktan sorumludur. Kuruluşlar genellikle kendi bünyelerinde değişen teknolojilere hızla adapte olabilmek için ekiplerini genişletmeyi ya da proje sürelerini uzatmayı tercih etmektedir. Fiziksel makinelerle başlayan yazılım sektörü, günümüzde sanallaştırma ve konteyner mimarisini takip etmektedir. Mikro servis mimarisinin şirketlerde yaygınlaşmasıyla birlikte konteynerler üzerinde çalışan uygulamaların sayısı ciddi oranda artmıştır. Bu durum konteynerlerin yönetilmesinde zaman, güvenlik, performans gibi sorunları da beraberinde getirmiştir. Konteyner yönetim araçlarından biri olan Kubernetes, bir komut satırı ara yüzü üzerinden haberleşerek konteynerleri yönetme imkânı sağlamaktadır. Bu çalışmada, birden fazla sektöre ve/veya işletmeye hizmet verirken hizmet olarak yazılım sağlayıcı kuruluşların değişen ihtiyaçlarına göre zaman ve ekip maliyeti konularını en aza indirmeyi hedefleyen bir yönetim aracının tasarlanması ve geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda Kubernetes kümeleme, bulut ortamında sanallaştırma ve çoklu bulut tabanlı bir mimaride geliştiricilerin altyapılarını yönetebilecekleri bir web uygulaması geliştirilmiştir. Kullanıcıların ilgili bulut sağlayıcılarından aldıkları erişim anahtarları ile uygulamaya giriş yapabilecekleri ve altyapılarını yönetebilecekleri kullanıcı dostu bir ara yüz tasarlanmıştır. Bu ara yüz ile son kullanıcıların ve geliştiricilerin istedikleri teknolojinin altyapı araçlarını hızlı bir şekilde yönetebildikleri ve basit bir dokümantasyon yöntemi ile birden fazla teknoloji arasında geçiş yapmakta zorlanmadıkları gözlemlenmiştir. Geliştirilen aracın bu alandaki araştırmalara örnek teşkil etmesi beklenmektedir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 3 November 2023
Received in revised form 6 January 2024
Accepted 3 February 2024
Available online 29 March 2024

Keywords:

Container management, Multi-cloud-based architecture, Software as a service, Kubernetes

Doi: [10.24012/dumf.1385760](https://doi.org/10.24012/dumf.1385760)

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

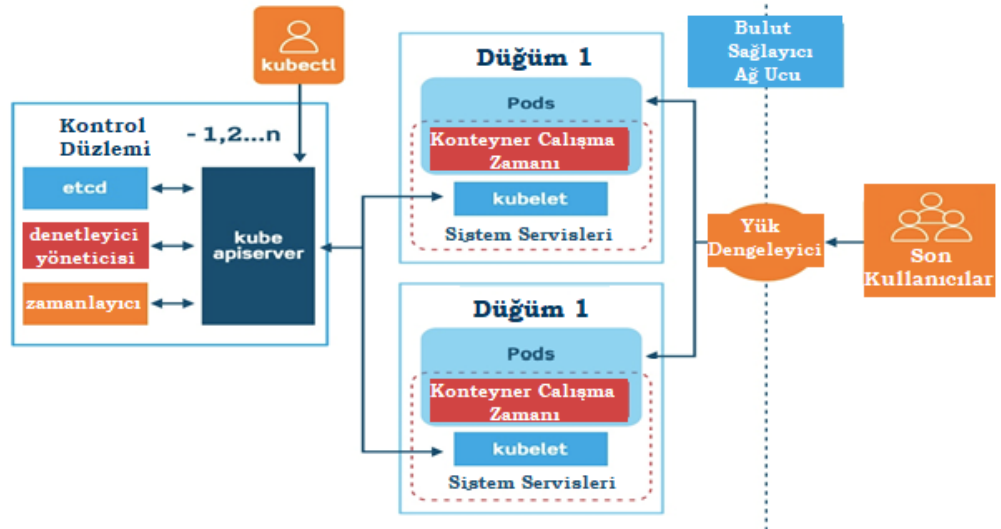
Software service providers are responsible for keeping up to date with changing and evolving technology tools and keeping their developer inventories up to date. Organizations generally prefer to expand their teams or extend project durations in order to quickly adapt to changing technologies within their own organization. The software industry, which started with physical machines, today follows virtualization and container architecture. With the widespread use of micro service architecture in companies, the number of applications running on containers has increased significantly. This situation has brought problems such as time, security, and performance in managing containers. Kubernetes, one of the container management tools, provides the ability to manage containers by communicating through a command-line interface. In this study, it is aimed at designing and developing a management tool that aims to minimize time and team cost issues according to the changing needs of software-as-a-service provider organizations while serving multiple sectors and/or businesses. In this direction, Kubernetes Cluster, virtualization in the cloud environment, and a web application where developers can manage their infrastructure in a multi-cloud-based architecture have been developed. A user-friendly interface has been designed where users can log in to the application with the access keys obtained from the relevant cloud providers and manage their infrastructure. With this interface, it has been observed that end users and developers can quickly manage the infrastructure tools of the desired technology and do not have difficulty switching between multiple technologies with a simple documentation method. The developed tool is expected to set an example for research in this field.

Giriş

Dijital dönüşüm altyapılarındaki hızlı teknolojik değişiklikler işletmelerin teknolojiye uyum süreçlerini zorlaştırmış, bu da bulut tabanlı altyapılara geçişe ön ayak olmuştur. Bulut bilişimde birçok katman hazır birer servis olarak sunulduğundan bu altyapı hem zaman hem de güncelleme maliyetinden kaynaklanan işgücünü azaltması açısından avantaj sunmaktadır [1]. Günümüzde bulut bilişim teknolojisi olarak pek çok servis sağlayıcısı ve yönetim aracı bulunmaktadır. Bu araçlar işletmelerin teknik sorunlarına çözüm getirmekle birlikte güvenlik ve yönetim gibi süreçler karmaşık hale gelebilmektedir. Bu durum da kurumlara ekstra maliyet olarak yansımaktadır. Yönetimi ve güvenliği karmaşık hale gelen teknolojilerden biri de konteyner teknolojileridir. Konteynerlerin servis ayarları, dosya yapıları, ağ ayarları, güvenlik ve uygulama yapılandırılmaları gibi pek çok noktada yönetsel karmaşıklık meydana gelmektedir [2]. Teknolojik yaklaşımlar zamanla ara yazılımlar, sanal makineler ve sanal cihazlara kadar değişmiştir. Docker, konteyner (kapsayıcı) tabanlı bir yaklaşımı temsil etmekte ve bu amaçla yaygın olarak kullanılmaktadır [3]. Docker teknolojilerinin başında Kubernetes gelmektedir. Kubernetes, bulut ortamında konteyner uygulama dağıtımı için yeni bir standarttır. Konteyner düzenleme sistemi, özellikle büyük ölçekli işletmeler için önemli fırsatlar ve çözümler sunmaktadır. Kubernetes konteynerlerin orkestrasyonunu sağlarken getirdiği otomatik ölçeklendirme, depolamayı yönetme, sürümleri kontrol etme gibi pozitif özellikleri sayesinde sektörde önemli bir yere sahip olmuştur. Konteynerlerin ölçeklendirilmesi, yönetimi ve izlemesi kubernetes teknolojisi ile oldukça kolay hale gelmektedir. Kubernetes altyapısında temel alınan çalışma mantığı istemci-sunucu mimarisidir. Sunucu üzerinde Uygulama Programlama Arabirimi (API), sunucu, etcd (veri tabanının anlık durumunu saklayan yapı), zamanlayıcı, kontrol yöneticisi gibi temel

Kubernetes yapıları çalışmaktadır. İstemci düğümleri ise konteyner çalışma zamanı, Kubelet ve Kube-proxy bileşenlerinden oluşmaktadır. Düğümler üzerinde podlar ve servisler çalışmaktadır. Sunucu düğümlerin erişiminin sağlanması için 443 numaralı porttan bağlantı gerekmektedir. Kubernetes üzerindeki sunucu düğümlerde iki farklı erişim yolu mevcuttur. Bunlardan ilki düğümler içerisinde bulunan kubelet bileşeni üzerinden erişim sağlanmasıdır. Şekil 1'de Kubernetes çalışma prensibi gösterilmiştir. Kubernetes çalışma prensibine göre Kubelet aracılığıyla podlara ait kayıtlara erişilmektedir. Kubelet'in sağladığı port yönlendirme ile çalışmakta olan podların bağlantısı kurulmaktadır. Bir diğer yöntem ise http bağlantılıları kullanılarak podlara ve servislere doğrudan erişimdir. Bu yöntem güvenlik açığı oluşturabileceğinden halka açık ağlarda kullanılmaması gereken bir yöntemdir. Kubernetes için zorunlu olan cluster kurulumunda iş yükünü hafifletmek için Kubeadm ve Kubespray araçları bütünleşmiş şekilde gelmektedir. Gerçekleştirim için iyi bir ağ bağlantısı, sistem tasarımı, terminal, Linux komutları, Go programlama dili ve konteyner teknolojisine hakimiyet gerekmektedir [4]. Kubernetes ve bulut ortamındaki katmanlı altyapıya yönelik bir çalışma gerçekleştirilmesi, gelişen yazılım sektöründe karmaşık hale gelen mikro servis yönetiminin kolaylaştırılması ve monolitik mimariden uzaklaşılması gerekli görülmektedir.

Bu çalışmada Kubernetes altyapılarını bulut ortamında gerçekleştirmek ve bu altyapıların bir kullanıcı ara yüzü ile son kullanıcı tarafından yönetimini sağlamak için web tabanlı bir yazılım tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yazılım (Çalışma kapsamında geliştirilen Web tabanlı Çoklu Bulut Teknolojisi Yönetimi Yazılımı - WtÇBTYY olarak kısaltılmış ve metin boyunca bu isimle anılmıştır) ile DevOps ve site güvenilirlik mühendisliğinde çalışan bireylerin iş yükünün azalması amaçlanmıştır.



Şekil 1. Kubernetes sisteminin çalışma prensibi

Metot

Bu çalışmada çeşitli sektörlerde ve işletmelere hizmet sunan yazılım sağlayıcı kuruluşlar, değişen ihtiyaçlara göre zaman ve ekip maliyetini minimize etmeyi hedefleyen bir yönetim aracının (WtÇBTYY) tasarlanması ve geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, Kubernetes kümeleme, bulut ortamında sanallaştırma ve çoklu bulut tabanlı bir mimari üzerine odaklanan bir web uygulaması geliştirilmiştir. Bu bölümde WtÇBTYY'nin tasarlanması ve geliştirilmesine yönelik yazılım yaşam döngüsü süreçlerine yer verilmiştir.

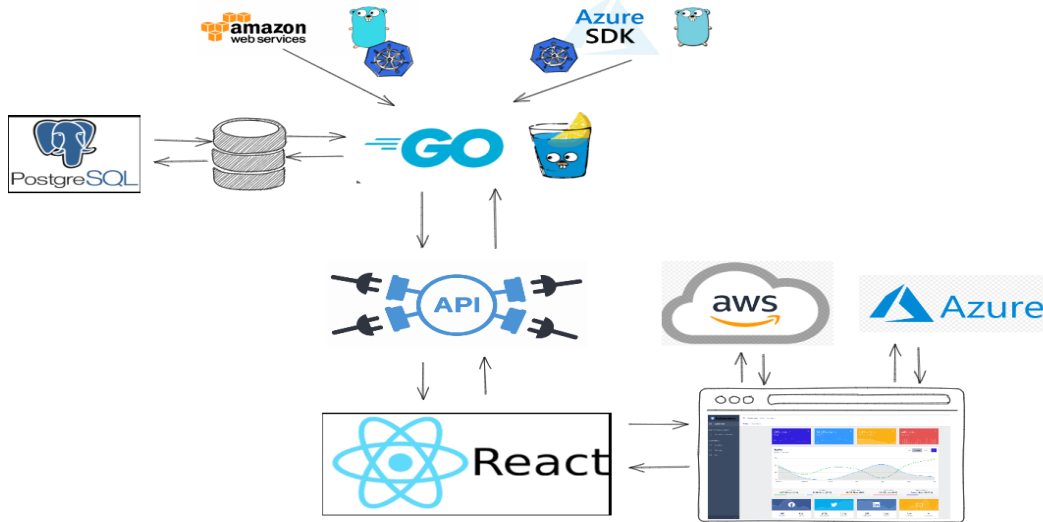
Planlama ve analiz

Bu aşamada bulut hizmeti teknolojisi öncüleri olan Google Cloud, Amazon Web Services ve Microsoft Azure platformlarında deneme hesapları oluşturulmuştur. Bu hesaplar ile bulut mimarileri, güvenlik kuralları, kullanıcı arayüzleri ve performansları incelenmiştir. Bulut bilişimin hizmet türlerinden birisi olan "hizmet olarak yazılım" bulut sağlayıcıların bulut ortamında yazılım hizmeti vermesi ve "kullandığım kadar öde" olanağına mantığına dayanan bir modeldir. Doksanlı yılların sonundan günümüze kadar pek çok hizmet olarak yazılım uygulaması geliştirilmiştir. Bu uygulamaların çoğu tek bir işi yapmak amacıyla tasarlanmış ve yıllık zorunlu abonelikler ile ya da zorunlu güncelleme/bakım hizmetleriyle geliştirici/ kullanıcı için çok büyük maliyetler oluşturmuştur. Her uygulama için yeni bir satın alma, hesap takibi, ara yüz değişimi ve kullanıcı alışkanlığı gibi zaman maliyeti de oluşturabilecek problemler gündeme gelmiştir. WtÇBTYY'nin en önemli özelliği zenginleştirilmiş kullanıcı arayüzü sunumudur.

Geliştirici/kullanıcı hizmet olarak yazılım sağlayıcılarının sunduğu API uygulamaları sayesinde ilgili bütün bulut tabanlı yazılımları tek bir ekran üzerinden yönetebilmektedir. Hizmet olarak yazılım modelinde öne çıkan kavramlardan birisi de DevOps kavramıdır. Ürünün bulut sunucusu ve DevOps tarafındaki arka uç operasyonlarının doğru yürütülebilmesi, işletim sisteminin ihtiyaca yönelik kurulması ve Kubernetes kümelerinin yığın depolayıcıda işlenebilmesi için en dengeli ve kararlı kurulumların yapılması gerekmektedir. Versiyon ve kaynak yönetimi doğru kurgulandığında sürdürülebilirlik açısından önemli bir sorun ortadan kalkmaktadır.

Proje yazılım mimarisi

Bu aşamada genelden özele bütün süreç Birleşik Modelleme Dili (Unified Modelling Language- UML) diyagramları ile şema haline getirilmesi gerekmektedir. Tüm süreçlerin çalışma ve veri tabanı kurgusu belirlenmeli ve sunucudan istemciye her bir adım şema haline getirilmelidir. Şekil 2'de WtÇBTYY'nin tasarım ve mimarisi görülmektedir. Şekil 2'ye göre ilk olarak Go Programlama dili ile arka uç kodların geliştirilmesi gerekmektedir. Bu kodlar ile hizmet olarak yazılım veren yapıların API end-pointlere sunucudan cevap verecek program oluşturulmalıdır. Sağ altta React çerçevesi kullanılarak geliştirilmiş ara yüzün ekran görüntüsü görülmektedir. Bu ara yüz ile kullanıcı etkileşime girdiğinde ilgili sağlayıcı sunucuya POST veya GET isteği göndermekte ve etkileşim sonucunu izleyerek veri tabanına kaydedebilmektedir.



Şekil 2. Altyapı yönetim uygulaması yazılım ve tasarım mimarisi

Hizmet olarak yazılım

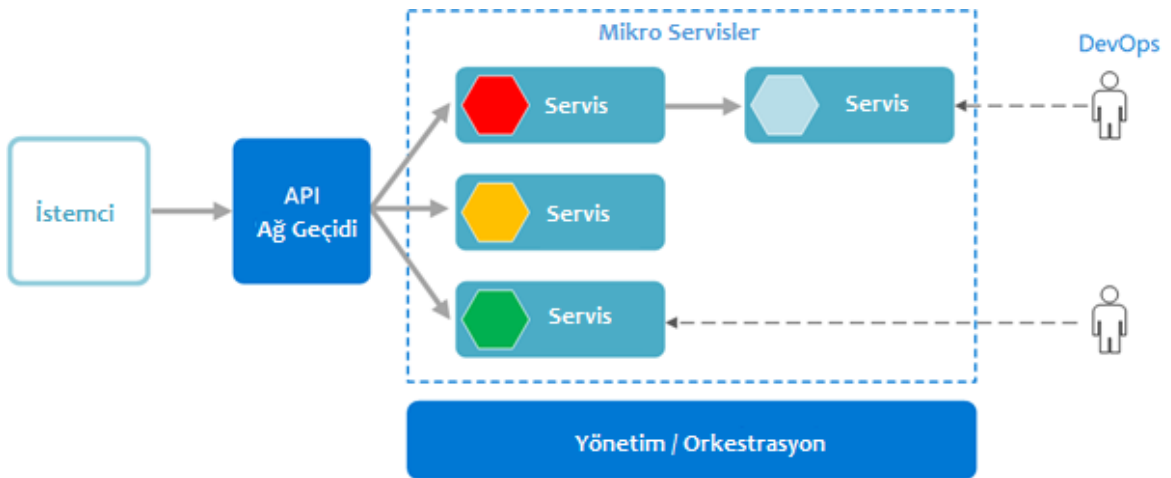
Herhangi bir sistem kurulumu gerekmeksizin, internet tarayıcısı üzerindeki bulut tabanlı platformlardan erişilebilen uygulamalara “Hizmet olarak yazılım” modeli adı verilmektedir. Bu çalışmada geliştirilen ve “Çoklu bulut tabanlı altyapı yönetim aracı” olarak adlandırılan yazılımda olduğu gibi müşteriler alt yapıdaki ağ, sunucu, işletim sistemi ve depolama aygıtları gibi bileşenleri yönetmez veya denetlemez. Bununla birlikte bu modelde kullanıcıya has uygulama ayarları yapılabilir [5]. Tablo 1’de müşteri ve sağlayıcı tarafların “hizmet olarak yazılım” modelindeki sorumluluklar listelenmiştir [6].

Tablo 1. Hizmet olarak yazılım modelinde müşteri ve sağlayıcı sorumlulukları

Müşteri	Sağlayıcı
<ul style="list-style-type: none"> Müşteri verilerinin toplanması ve işlenmesi konusundaki veri koruma yasalarına uyum Kimlik yönetim sisteminin bakımı Kimlik doğrulama platformunun yönetimi (şifre politikalarının uygulanması dahil) 	<ul style="list-style-type: none"> Fiziksel destek altyapısı Fiziksel altyapı güvenliği ve kullanılabilirlik (Sunucular, depolama, ağ bant genişliği) İşletim sistemi yama yönetimi ve sıkılaştırma prosedürleri Güvenlik platform yapılandırmaları Sistem takibi ve izleme Güvenlik Platformu bakımları (Güvenlik Duvarı, Host IDS, Anti virüs)

Mikro servis mimarisi

Mikro servisler bulut ve konteynerizasyon teknolojileriyle birlikte son dönemlerde vazgeçilmez haline gelmiştir. Bu yapıda, servis yönelimli mimarinin aksine sunulan hizmetlerin her birinin otonom yani kendi kaynaklarının tüketimiyle çalışması beklenmektedir. Servisler arasındaki bağımsızlıkların birbirinden ayrılmasını amaçlamaktadır. Şekil 3’te mikro servis mimarisinde istemciden geliştiriciye mikro servislerin yönetim süreci gösterilmektedir. Şekil 3’te geleneksel mimariden (monolitik ve katmanlı) farklı olarak mikro servis mimarisinin, bir uygulamanın belirli bir grup fonksiyonu sağlamaya adanmış hizmetlere bölündüğü görülmektedir [7]. Bu bireysel hizmetler, diğer hizmetlerden bağımsız olarak geliştirilip dağıtılabilmekte ve diğer mikro servislerin sağladığı hizmetlere hafif iletişim mekanizmaları aracılığıyla erişebilmektedir [8]. Mikro servis mimarisinin yüksek ölçeklenebilirlik, sürdürülebilirlik, pazara kısa sürede ulaşım, çok dilli geliştirme şeklinde sıralanan avantajları bulunmaktadır. Mikro servis mimarisinin sağladığı bu avantajlar gelişmesinin ve ilerlemesinin en önemli etkenleridir [9].



Şekil 3. Mikro servis mimarisinde istemciden geliştiriciye mikro servislerin yönetim süreci

Şirket içi sistemler

Şirket içi (On-Premise) sistem kavramı bulut tabanlı uygulamaların ortaya çıkması ile birlikte yeniden gündeme gelmiştir. Bu sistemlerde yazılımlar işletmenin özel fiziksel sunucularında faaliyet gösterir ve genellikle şirketin mülkiyetinde veya kiralık olarak işletilen bir veri merkezinde bulunur. Şekil 4'te Şirket içi ve bulut mimari arasındaki fark gösterilmektedir.



Şekil 4. Şirket içi ve bulut mimarisi karşılaştırması

Gin web çerçevesi

Gin web çerçevesi, Go programlama dilinde yazılmış bir çalışma alanı kütüphanesidir. Sunucu ve api gateway oluşturma kolaylığı sağlamaktadır. go get -u github.com/gin-gonic/gin komut çalıştırıldığında Go bağımsızlıklarına Gin kütüphanesini eklenmektedir. Şekil 5'te Gin web çerçevesi kullanılarak web sunucusu oluşturan kod örneği görülmektedir.

Şekil 5 incelendiğinde ilk aşamada Github üzerinden dağıtılan Gin kütüphanesinin içeriye alındığı görülmektedir. Ana fonksiyon içerisinde varsayılan bir Gin yönlendiricisi tanımlanmaktadır. Index parametresi ana sayfayı içerisindedir barındırmakta ve GET fonksiyonu ile yönlendirilmektedir. Son olarak "run" fonksiyonu çalıştırılarak sunucu başlatılmaktadır.

```

package main

import (
    // kütüphanemizi içeri aktaralım
    "github.com/gin-gonic/gin"
)

func main() {
    //gin'in varsayılan ayarlarında bir yönlendirici oluşturalım.
    router := gin.Default()

    //anasayfayı inde fonksiyonumuz yakalayacak
    router.GET("/", index)

    //daha sonra sunucuyu başlatıyoruz
    router.Run()
}

//anasayfayı yakalayacak olan fonksiyonumuz
func index(c *gin.Context) {
    //c ile gin nesnemize bağlam oluşturduk.
    //c'yi kullanarak artık gin özelliklerine erişebiliriz.

    //sayfaya düz yazı gönderdik
    c.String(200, "Merhaba Dünya")
    //Buradaki 200 sunucudan bir cevap geldiğini anlamına gelir
}

```

Şekil 5. Gin web çerçevesi kullanılarak web sunucusu oluşturan kod örneği

Gerçekleştirim ve test

Tarihsel olarak sanallaştırma teknolojileri, süreçlerin yönetilebilir konteyner birimleri olarak programlanması ihtiyacından doğmuştur. Söz konusu işlemler ve kaynaklar dosya sistemi, bellek, ağ ve sistem bilgileridir [10]. Bulutun temel sanallaştırma yapısı olan sanal makineler, planlama, paketleme ve kaynak erişimi (güvenlik) sorunlarına dikkat ederek WtÇBTYY geliştirilmiştir.

WtÇBTYY geliştirilirken aşağıdaki teknik metot haritasının uygulanmasına karar verilmiştir:

- Kubernetes kümeleri oluşturulmuş ve konteyner-durum geliştirmeleri yapılmıştır.
- Go programlama dili kullanılarak hizmet olarak yazılım veren uygulama sağlayıcılarının API endpointleri ile iletişim kuracak program geliştirilmiştir.
- Ürünün veri tabanı kayıtları ve faturalandırma modülleri geliştirilip ara yüze dahil edilecek tasarlanmıştır.
- Ürünün ara yüzü için gerekli ön uç kütüphaneleri kurulmuş, ilgili kullanıcı etkileşimleri gerçekleştirilmiştir.
- Son kullanıcı testleri gerçekleştirilmiştir ve uygulama ürün ortamına alınmıştır.

Yetkilendirme altyapısının oluşturulması

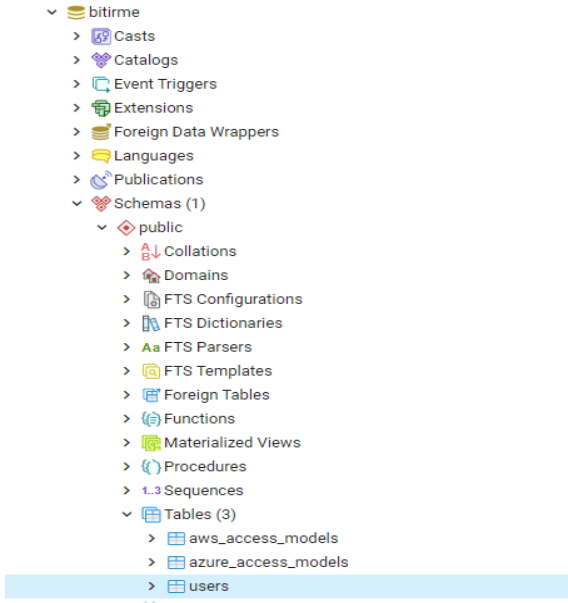
Çoklu bulut sağlayıcı ortamlar için kimlik ve erişim yönetimi (IAM) gibi yetkilendirme sistemlerinde kullanılan "Erişim belirteci" yapısı, WtÇBTYY'deki kullanıcılar ile ilişkilendirilmek için yazılımda kullanılmıştır. Bu belirteçler kullanıcı dostu bir ara yüz ile kullanıcının ihtiyacına göre eklenebilmekte ya da çıkarılabilmektedir. Kullanıcılar belirteçlerini kendileri isimlendirebilmektedir ancak belirteç ismi, "Subscription Id" bilgileri kullanılan ilgili bulut sağlayıcısında rastgele oluşmaktadır. Şekil 6'da Amazon web servisi IAM yapısı görülmektedir.



Şekil 6. Amazon web servisi IAM yapısı

Restful API veri tabanı ilişkisinin oluşturulması

REST ve internetin popüler hale gelmesinden önce, web uygulama hizmetleri arasında entegrasyon sağlamak oldukça zor bir süreçtir. API uygulamalar arasında iletişimi sağlayan bir araçtır. Bir istemci tarafından RESTful API üzerinden yapılan bir istekte, kaynak bir uca gönderilmektedir. Alınan veri JSON, XML gibi formatlarla HTTP protokolü üzerinden elde edilmektedir. Diğer bilgiler, meta veriler, yetkilendirmeler, URI'lar, çerezler vb. HTTP başlıkları üzerinden gönderilmektedir [11]. Şekil 7'de Postgre SQL ara yüzünde yazılımın veri tabanı görüntüsü görülmektedir.



Şekil 7. Postgre SQL ara yüzü ekran görüntüsü

İyimser kilitleme

İyimser (optimistik) kilitleme, bir veri tabanı işlemi sırasında aynı kaynağa birden fazla aynı işlemin yapılmasını engellemek için kullanılan bir kısıtlama yöntemidir. RESTful web hizmetleri, her kaynak URI'ye, karşılık gelen kaynağın mevcut durumuna dayalı olarak üretilen temsilci bir durumsal hizmet sağlayıcıdır. Bu nedenle, bağlantı kaynağı güncellendiğinde müşterilerin bir oturum başlatmasını engelleyen durumsuzluk kısıtlamasına uygun bir şekilde

eşzamanlı durum değişiklikleriyle başa çıkmak önemlidir. Bu desen tarafından ele alınan sorun, stateless kısıtlamasına uygun bir şekilde eşzamanlı kaynak güncellemeleri ile başa çıkmaktır [12].

Sistem üzerinde oluşturulan müşteri bilgileri ve müşterilere ait erişim belirteci, gizli belirteç, kiracı tanımlayıcı gibi bilgilerin kullanıcı ile ilişkilendirilmiş bir şekilde oluşturulması için veri tabanına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda WtÇBTYY'de şekil 7 de görüldüğü üzere ilişkisel veri tabanı Postgre SQL tercih edilmiştir. Go programlama dili ile bir nesne-ilişkisel eşleme aracı olan Gorm kullanılarak ilgili modellerin veri tabanı bağlantısı sağlanmıştır. Şekil 8'de kullanıcı ara yüzünden girilecek girişlere sunucudan cevap döndürecek POST metodunun yapısı görülmektedir.

```
package models

import "gorm.io/gorm"

type User struct {
    gorm.Model
    Username string    gorm:"size:255;not null;unique" json:"username,required"
    Email    string    gorm:"size:100;not null;unique" json:"email,required"
    Password string    gorm:"not null" json:"password,required"
    AwsAccessModel []AwsAccessModel json:"aws_accesses" gorm:"foreignkey:UserID"
    AzureAccessModel []AzureAccessModel json:"azure_accesses" gorm:"foreignkey:UserID"
}
```

Şekil 8. Kullanıcı ara yüzünden girilecek girişlere sunucudan cevap gönderecek POST metodunun yapısı

Şekil 8 de görüldüğü gibi Gorm kullanarak bir kullanıcı yapısı oluşturulmuştur. Gorm, Ruby'nin ActiveRecord veya Java'nın Hibernate yolunu izleyen Go için bir nesne-ilişkisel eşleme olarak tanımlanmaktadır [13].

Post ve get metotlarının oluşturulması

WtÇBY için kullanılacak olan fonksiyonların POST ve GET metotlarının URL parametreleri ve kontrolcülere oluşturulmuştur. Şekil 9'da kullanıcı ara yüzünden istek gönderilecek POST metodunun URL ve fonksiyon tanımlamaları görülmektedir.

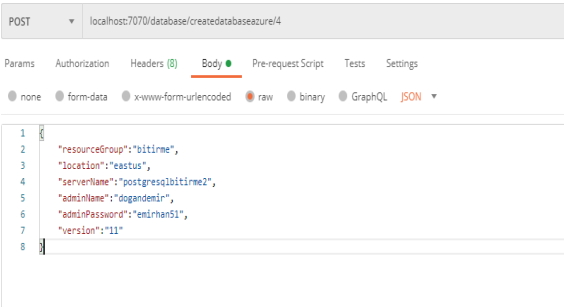
```
func SetupVirtualMachinesRoutes(router *gin.Engine) {
    virtualMachinesGroup := router.Group("/vm")
    {
        virtualMachinesGroup.POST(relativePath: "/createazure/userid", controllers.CreateAzureInstanceHandlers)
        virtualMachinesGroup.POST(relativePath: "/createaws/userid", controllers.CreateAwsInstanceHandlers)
        virtualMachinesGroup.GET(relativePath: "/getlistaws/userid", controllers.GetInstanceHandler)
        virtualMachinesGroup.GET(relativePath: "/getlistazure/userid", controllers.GetAzureInstanceHandlers)
    }
}
```

Şekil 9. Kullanıcı ara yüzünden istek gönderilecek POST metodunun URL ve fonksiyon tanımlamaları

- Create Azure: Bu fonksiyona istek atıldığında giriş yapmış kullanıcı Azure platformunda bir sanal makine oluşturabilmektedir.
- Create Aws: Bu fonksiyona istek atıldığında giriş yapmış kullanıcı Amazon Web Service platformunda bir sanal makine oluşturabilmektedir.
- Get List Aws: Bu fonksiyona istek atıldığında giriş yapmış kullanıcı Aws platformunda oluşturduğu tüm sanal makineleri listeleyebilmektedir.
- Get List Azure: Bu fonksiyona istek atıldığında giriş yapmış kullanıcı Azure platformunda oluşturduğu tüm sanal makineleri listeleyebilmektedir.

Postman kullanılarak endpointlerin testi

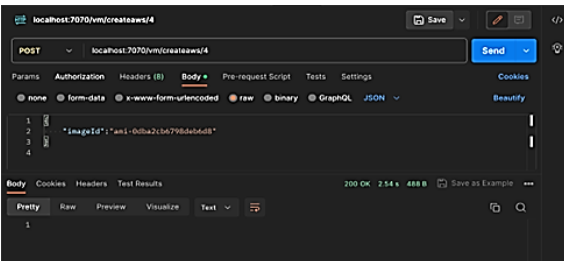
Postman, gerçekçi bir senaryo ile geliştirilen uygulamaları test etmeyi sağlayan bir uç-nokta test uygulamasıdır. Go programlama dilindeki yönlendirme yapısını kullanarak oluşturulan uç-nokta gruplarının çalışıp çalışmadığını test etmek üzere Şekil 10'da Postman üzerinde Json-raw formatındaki Body alanına ilgili parametreler verilmiştir.



```
POST localhost:7070/database/createdatabaseazure/4
Body
JSON
1
2
3
4
5
6
7
8
{"resourceGroup": "bitirme",
"location": "eastus",
"serverName": "postgresbitirme2",
"adminName": "dogandemir",
"adminPassword": "emirhan51",
"version": "11"}
```

Şekil 10. Postman uygulaması kullanarak endpointlerin testi

Şekil 11'de endpointlerin yanıt metinleri analiz edilmiştir. 200 başarılı yanıt uygulamanın doğru çalıştığını göstermektedir.



```
POST localhost:7070/vm/createaws/4
Body
JSON
1
2
3
4
{"imageId": "ami-0c8a2cb4799d6b4d8"}
Body
Cookies
Headers
Test Results
200 OK 254 s 488 B Save as Example
Pretty Raw Preview Visualize Text
```

Şekil 11. Sunucudan “200 OK” dönen Create Aws fonksiyonunun testi

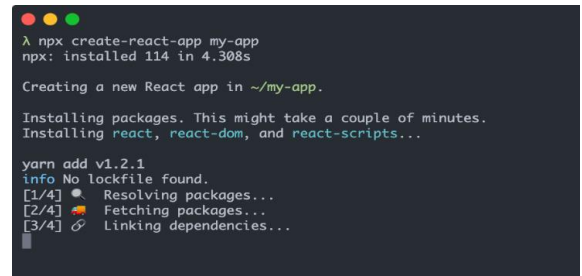
Ön-yüz için gerekli araçların kurulumu ve kullanıcı ara yüzü oluşturulması

WtCBYY'nin ön-yüz geliştirmelerine başlamadan önce ilk olarak geliştirme yapılacak programlama dilinin, çevresel araç ve kütüphanelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu araştırmada en popüler ön-yüz geliştirme araçlarından biri olan React.js kütüphanesi tercih edilmiştir. React.js kütüphanesi sunduğu bileşen fonksiyon ve sınıfsal fonksiyon yapıları ile oldukça sık kullanılan bir kütüphanedir. React.js'nin verimliliğinin temelinde sanal Belge Nesnesi Modeli (Document Object Model - DOM)'nin yenilikçi kullanımı yatmaktadır. Performansı optimize etmek için sanal DOM'u anlamak ve kullanmak çok önemlidir. Sanal DOM, gerçek DOM'un hafif bir temsili gibi davranarak React'ın veri değiştiğinde gereken güncelleme ve yeniden oluşturma sayısını en aza indirmesine olanak tanımaktadır. Bu teknik, tarayıcının iş yükünü önemli ölçüde azaltarak oluşturma sürelerinin daha hızlı olmasını sağlamaktadır [14].

React kodlarının sanal bir sunucuda gerçekleştirilmesi için ihtiyaç duyulan en temel çerçeve ise Node kütüphanesidir. İlk etapta projenin çevresel bileşenleriyle uyumlu bir şekilde çalışabilmesi için sağlam çalışan ve pek çok kütüphaneyi sorunsuz çalıştıran bir Node versiyonu belirlenmesi gerekmektedir. Node versiyonu belirlendikten sonra ilgili işletim isteminin terminalinde tercih edilen paket yükleyicisi ile Node Versiyon Yönetimi aracının kurulması gerekmektedir. Node Versiyon Yöneticisi kurulduktan sonra tercih edilen Node versiyonunun sisteme kurulumu geliştirilmeye hazır hale getirilmesi gerekmektedir. Terminal ekranı açıldıktan sonra ilk olarak “curl <https://raw.githubusercontent.com/nvm-sh/nvm/v0.39.1/install.sh> bash” komutu çalıştırılmalıdır. Bu komut çalıştırdıktan sonra Node Versiyon Yöneticisi kurulumu tamamlanmaktadır. Daha sonra “nvm install #version” komutu çalıştırılarak tercih edilen Node versiyonu kurulumu gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada en stabil versiyon olarak Node 16 versiyonu tercih edilmiştir.

React uygulamasının oluşturulması

Node kütüphanesi kurulduktan sonra, sistem node paket yöneticisinde bulunan tüm kütüphanelere erişebilir hale gelmektedir. Şekil 12'de bir React uygulamasının terminal ekranında oluşturulması gösterilmektedir.



```
λ npx create-react-app my-app
npx: installed 114 in 4.308s

Creating a new React app in ~/my-app.

Installing packages. This might take a couple of minutes.
Installing react, react-dom, and react-scripts...

yarn add v1.2.1
info No lockfile found.
[1/4] Resolving packages...
[2/4] Fetching packages...
[3/4] Linking dependencies...
```

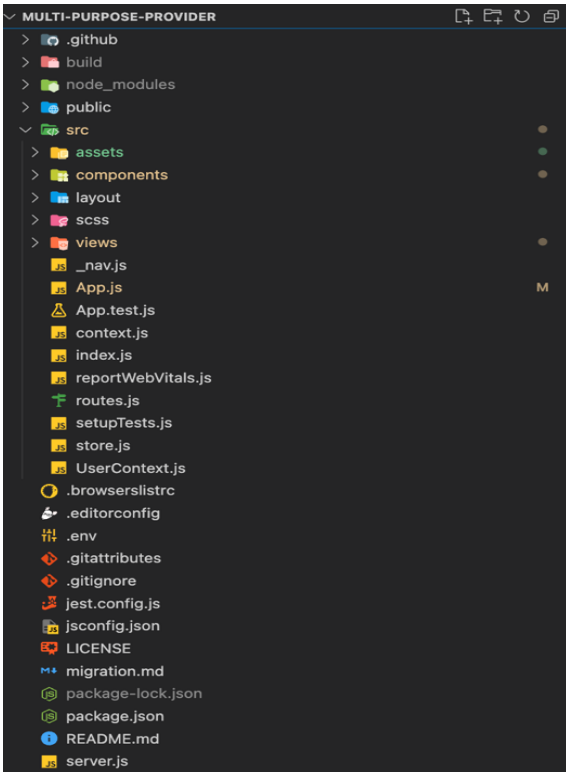
Şekil 12. Terminal ekranında React uygulaması oluşturma

“npx create-react-app #proje-adi” komutu çalıştırılarak istenilen bir dizinde React projesi oluşturulmaktadır. Ancak bunun yerine projenin ihtiyaçlarına göre boş bir node modül

şablonu oluşturarak da proje başlangıcı sağlanabilmektedir. Tüm bu aşamaları gerçekleştirildiğinde sistem ön yüz geliştirmeleri React kütüphanesi kullanarak geliştirmeye hazır hale gelmektedir. Projenin oluşturulduğu dizine giderek `"npm start"` komutuyla React uygulaması başlatılmaktadır.

React projelerinde klasör mimarisi ve standartlar

Ön-yüz geliştirme için tüm kurulumlar gerçekleştirildikten sonra React uygulaması içerisinde uygulama amaçlarına uygun bir şekilde dosya mimarisi kurulumu yapılmaktadır. Dosya mimarisi birlikte çalışan ekip için büyük önem taşımaktadır. Standartların belirlenmesi yönetimi kolaylaştırılırken ürünün uzun dönemde bakımının sağlanabilmesi için oldukça önemlidir. Şekil-13'te bu çalışmanın ön-yüz geliştirmek için tercih edilen dosya mimarisi editör ekranında gösterilmiştir.



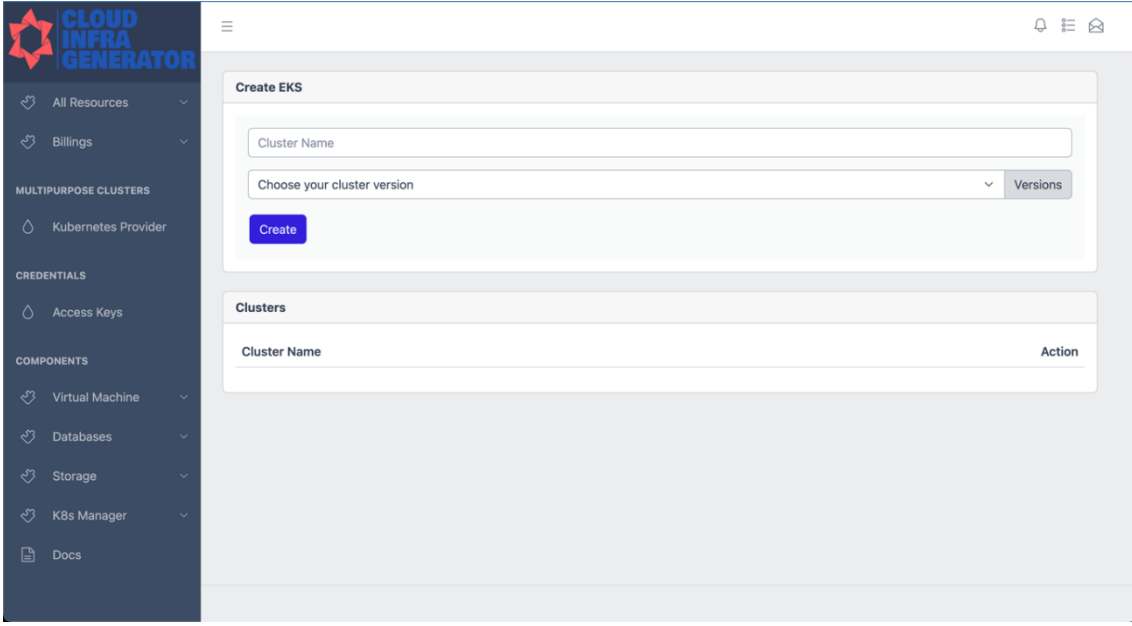
Şekil 13. React uygulamasının dosya mimarisi

Public klasöründe uygulamanın çıktısını veren tarayıcıyla etkileşime geçen index.html vb. dosyaları bulunmaktadır. Src klasöründe uygulamada da kullanılacak componentleri, contextleri, routes yapıları, fetch yapıları gibi tekrar kullanılabilir araçların kaynak kodlarının bulunduğu klasördür. Components klasöründe tekrar kullanılabilir bileşenler oluşturulmaktadır. Örneğin kullanıcıdan birden

fazla yerde girdi alınacak bir girdi kutusuna ihtiyaç varsa girdi kutusu bileşeni burada oluşturulmalıdır.

Kullanıcı ara yüzü

Bu aşamaya kadar sunucuya istek gönderen fonksiyonların testi gerçekleştirilmiştir. Son adımda sunucudan dönen istekler ile kullanıcı ara yüzü tasarımı gerçekleştirilmiş ve arka plan etkileşimleri tamamlanmıştır. Şekil 14'te gösterilen yan menü, kullanıcıların sayfalar arasında gezinimini yönlendirmek amacıyla tasarlanmıştır. Bu menü, kullanıcılara "Access Keys" ekranına giderek erişim anahtarlarını içeri aktarma ve ilgili bulut barındırıcılarında sanal makineler oluşturma imkanı sunar. Ayrıca, yan menüde yer alan "K8s Manager" seçeneği üzerinden kullanıcılar, oluşturdukları sanal makineler üzerinde Kubernetes kümelerini oluşturabilir ve ilgili sanal makinelerde bu kümeleri yönetme yeteneğine sahiptir. Menü üzerinde bulunan Databases seçeneğinden ilgili bulut hizmetiyle veri tabanını oluşturmada, Storages ekranından kaynaklarını takip edebilmektedir. Hizmet olarak yazılım veren uygulamalar kullandığın kadar öde metodunu temel almaktadır. Bu sebeple Billings ekranında kullanım ile paralel olarak faturalandırma ekranları takip edilebilmektedir. All Resources ekranında sunucuya gönderilen GET isteğiyle tüm kaynaklar Gösterge Paneline takip edilebilmektedir. Şekil 14'te açılan Create EKS ekranında kullanıcı Küme adını ve sisteme entegre edilmiş küme versiyonunu seçerek Elastic Kubernetes kümesini oluşturabilmektedir. Ayrıca altındaki Clusters şablonundan açık olan tüm kümelerini görüntüleyebilmektedir.



Şekil 14. WtÇBY Y kullanıcı ara yüzü ekran görüntüsü

Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada farklı bulut ortamlar üzerinde müşterilerin maliyet analizleri, ortam bilgilerine ilişkin veriler toplanmış olup ilgili şirket ve bireylerin birden fazla altyapı yönetim ortamında uygulamalarının koşturulmasının sağlandığı ve WtÇBY Y adı verilen bir uygulama tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Bu uygulama sayesinde sanal makine yönetimleri, veri tabanı yönetimleri ve uygulamaların çalışacağı küme ve depolama gibi bilgiler elde edilerek kullanıcıların bu ortamlarda aktif olarak işlem yapması mümkün kılınmıştır.

Sanallaştırma, fiziksel bir sunucu bilgisayarı birden fazla sanal sunucuya bölünerek kaynakların daha etkin kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Sanal makineler, her biri kendi işletim sistemine ve uygulamalarına sahip olan izole bir ortamda çalışmaktadır [15]. Konteynerleştirme ise, uygulamaların daha az kaynak tüketerek sistem yükünü hafifleten yapılarıdır. İşletim sistemi düzeyinde daha performanslı ve verimli çalışmalarına olanak sağlamaktadır. Ara yüz karmaşıklığından kurtulmak basit ve kullanımı kolay bir ara yüz üzerinden işlemleri yapmak iş birimlerinde ve takımlarında öğrenme maliyetini düşürmektedir [15].

Bu çalışmada geliştirici ekipler ve son kullanıcılar için hazırlanmış bir ara yüz oluşturulmuştur. Bir doğrulama metodu ile sisteme giriş yapabilecek ekranlar gerçekleştirilmiştir. WtÇBY Y'nin özellikle DevOps kültürüne önem veren kurumlar için oldukça önemli bir uygulama olduğu düşünülmektedir. Hizmet veren kurumlar müşterilerin değişen ihtiyaçlarına hızlıca yanıt verebilme kapasitesiyle doğru orantılı bir şekilde kazanım elde etmektedir. "Hizmet olarak yazılım" hizmeti verebilmek için değişken yapılarla hızla uyum sağlayabilmek gerekmektedir. Bu noktada geliştirici ekiplere söz-dizimi, fonksiyon tipleri ve kullanıcı yönetim ekranları tasarlama sürecinde ekiplerde oluşan zaman maliyeti ve yönetimsel problemlere çözüm getirilmiştir.

Çalışmanın bir takım sınırlılıkları bulunmaktadır. Bulut sağlayıcıların end-point testlerindeki en büyük kısıtlardan birisi, Kubernetes kümesi kurup bulut ortamda sanal makine kurma gibi döviz olarak faturalandırılan araçların defalarca kez test edilerek ürün ortamına taşınmasıdır. Geliştirilen altyapı yönetim aracı bu çalışma özelinde yalnızca bulut ortamda Kubernetes kümeleri oluşturup sanal makineler üzerinde iş yapacak yapıları, depolayıcıları oluşturup kaynakları takip etme üzerine sınırlandırılmıştır. Öte yandan geliştirilen WtÇBY Y'nin iyileştirilmesine yönelik bu alanda çalışma yapacaklara bir takım öneriler sunulabilir. Bunlar şu şekilde sıralanabilir:

- Altyapı yönetim aracı uygulamasındaki en önemli faktörlerden birisi güvenlidir. Kuvvetli bir kullanıcı doğrulama metodu kullanılabilir. Bunun için en iyi seçeneklerden biri iki faktörlü doğrulama ile kullanıcı girişi sağlanıp, kullanıcı parola, erişim anahtarı gibi veriler uuid şifreleme metodu ile veri tabanında depolanabilir.
- Kullanıcı giriş işlemleri, küme oluşturma, sanal makine oluşturma işlemleri Polygon gibi blok zincirlerinde SHA256 ve daha da üst düzey şifreleme metodlarıyla ilgili blok zinciri ağındaki dağıtık defterlerde sıfır komisyon ile kayıt tutulabilir.
- Kullanıcılar Azure, Google, AWS gibi bulut sağlayıcılarında kısıtlı işlemler yapabilmektedir. Çok daha fazla Bulut sağlayıcısı entegrasyonu yapılabilir. Böylelikle web uygulamasının ideal amacı daha yüksek oranda yakalanmış olacaktır. Kurumlar DevOps ve bulut konseptinde sunucusuz yapı modeline uyumluluk sağlarken, geliştirmeyi yapan ekipler bu çalışmayı çoklu yönetim ve no-code metodunu esas alarak geliştirmeler yapabilir. Daha fazla bulut sağlayıcı, daha fazla altyapı aracı eklenerek geliştirmeler yapılabilir.
- Bu uygulamayı kullanacak ekipler için role yönetimi ekranı ve iş birliği yapısı entegrasyonu sağlanmalıdır. Böylelikle

büyük bir proje yönetiminde ekibin görev dağılımı kolaylıkla yapılabilir.

•Web uygulama ara yüzünden tarayıcı eklentisiyle çalışan bildirim özelliği eklenerek kullanıcı deneyimi güçlendirilebilir

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Bu çalışmada herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır. Ayrıca çalışmanın doğası gereği etik kurul belgesi gerekmemektedir.

Yazar Katkıları

Hacer ÖZYURT, Kavramsal çerçeve, Yazılım ve mimarisel tasarım, Makale yazımı

Yusuf Can AKIER, Yazılım ve mimarisel tasarım, Uygulama geliştirme, Test, Entegrasyon

Özcan ÖZYURT, Kavramsal çerçeve, Sistem tasarımı, Makale yazımı

Kaynaklar

[1] M. Köse, and E. Küçükşille, “Bilişim altyapısı üzerine sunucusuz mimari platformu inşa etme”. Mühendislik bilimleri ve tasarım dergisi, Vol. 9, no. 2, pp. 683-700, 2021. doi.org/10.21923/jesd.929649.

[2] C. Koçak, and F. Yardımcı, “Çoklu bulut servis sağlayıcıları üzerinde kubernetes platformu kullanılarak sunucusuz mimari geliştirilmesi”, 4th International Scientific Research Congress (IBAD - 2019) Proceedings, April 25-26, pp.42-51, 2009, doi: 10.21733/ibad.554904

[3] K. Noyes, “Docker: A ‘Shipping Container’ for Linux Code”,2013.[Online].Available:https://www.linux.com/news/docker-shipping-container-linux-code/

[4] P. Martin, and P. Martin, “Creating a cluster with kubeadm. kubernetes: preparing for the cka and ckad certifications”, 1-9,2021.

[5] Y. Çetiner, “Bulut bilişim ve örnek bir saas uygulaması”, Yüksek lisans tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, Türkiye, 2014.

[6] D. Catteddu, “Cloud computing: benefits, risks and recommendations for information security”,Web Application Security: Iberic Web Application Security Conference, IBWAS 2009, Madrid, Spain, December 10-11, 2009.

[7] J. P. Gouigoux, and D. Tamzalit, “From monolith to microservices: lessons learned on an industrial migration to a web-oriented architecture”, IEEE international conference on software architecture workshops (ICSAW),pp. 62-65, 2017.

[8] M. del Pilar Salas-Zárate, , G. Alor-Hernández, R. Valencia-García, , L. Rodríguez-Mazahua, A. Rodríguez-González, and J. L. L. Cuadrado, “Analyzing best practices on web development frameworks: the lift approach”, Science of computer programming, Vol. 102, pp. 1-19, 2015, doi.org/10.1016/j.scico.2014.12.004.

[9] H. Knoche, and W. Hasselbring, “Drivers and barriers for microservice adoption—a survey among professionals in germany”, Enterprise Modelling and Information Systems Architectures (EMISAJ)–International Journal of Conceptual Modeling: Vol. 14, Nr. 1,2019.

[10] C. Pahl, “Containerization and the paas cloud”. IEEE Cloud Computing, Vol. 2, no. 3, pp. 24-31,2015.

[11] M.F.S. Lazuardy, and D. Anggraini, “Modern front end web architectures with react. js and next. Js”, Research Journal of Advanced Engineering and Science, Vol. 7, no.1, pp.132-141, 2022.

[12] C. Pautasso, and E. Wilde, “RESTful web services: principles, patterns, emerging Technologies”. In Proceedings of the 19th international conference on World wide web, April,2010, pp. 1359-1360.

[13] S.S. Chang, “Go web programming”, Simon and Schuster,2016

[14] A. O’rinboev, “Analyzing the efficiency and performance optimization techniques of react. js in modern web development”, Инновационные исследования в современном мире: теория и практика, Vol. 2, no. 24, pp. 54-57, 2023.

[15] M. J. Scheepers, “Virtualization and containerization of application infrastructure: a comparison.” In 21st twente student conference on IT, Vol. 21, pp. 1-7, 2014.



Using GAN Methods for Aerial Images Segmentation

Sara ALTUN GÜVEN^{1*}, Buket TOPTAŞ²

¹Tarsus University, Computer Engineering Department, saragoven@tarsus.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-2877-7105

²Bandırma Onyedli Eylül University, Software Engineering Department, btoptas@bandirma.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-2556-8199

ARTICLE INFO

Article history:

Received 05 November 2023
Received in revised form 2
February 2023
Accepted 11 February 2024
Available online 29 March 2024

Keywords:

deep learning,
semantic segmentation,
aerial images,
GANs.

Doi: 10.24012/dumf.1386384

* Corresponding author

ABSTRACT

Object detection and segmentation in aerial images is currently a vibrant and significant field of research. The iSAID dataset has been created for object detection in images captured by aerial vehicles. In this study, image semantic segmentation was performed on the iSAID dataset using Generative Adversarial Networks (GANs). The compared GAN methods are CycleGAN, DCLGAN, SimDCL, and SSimDCL. All methods operate on unpaired images. DCLGAN and SimDCL methods are derived by taking inspiration from the CycleGAN method. In these methods, cost functions and network structures vary. This study thoroughly examines the methods, and their similarities and differences are observed. After semantic segmentation is performed, the results are presented using both visual and measurement metrics. Measurement metrics such as FID, KID, SCOOT, PSNR, FSIM, and SSIM are used. When looking at the metric results, the SSimDCL method ranks first with 132.62071 FID, 0.07825 KID, 0.6406 SCOOT, 0.85973 PSNR, 37.862 FSIM, and 0.82725 SSIM; the SimDCL method shows the second-best performance with 149.82306 FID, 0.10215 KID, 0.60142 SCOOT, 0.85224 PSNR, 37.4747 FSIM, and 0.82429 SSIM. The CycleGAN method, on the other hand, ranks last among the applied methods with results of 202.33857 FID, 0.16795 KID, 0.53218 SCOOT, 0.83408 PSNR, 35.7062 FSIM, and 0.7751 SSIM. Experimental studies show that SSimDCL and SimDCL methods outperform other methods in iSAID image semantic segmentation. CycleGAN method, on the other hand, is observed to be less successful compared to other methods. The aim of this study is to perform automatic semantic segmentation in aerial images.

Introduction

Aerial image, which includes images of objects captured from the air, is a popular technological tool used in various fields such as aviation, geographic information systems, and agriculture. Aerial photography, or aerial imaging, involves capturing images from an aircraft, drone, or other airborne platforms. When capturing moving images, it is referred to as aerial videography. Aerial and satellite images, known as remotely sensed images, allow for accurate mapping of land cover and enable the understanding of landscape features at regional, continental, and even global scales.

Semantic segmentation, a popular field that is accomplished with deep learning methods, is used to distinguish objects in aerial images. Semantic segmentation is the process of assigning each pixel in an image to predefined classes and is widely used in computer vision-related areas. Semantic segmentation has a extensive body of literature. Approaches to semantic segmentation can be categorized into traditional and innovative methods. Traditional segmentation methods exclusively utilize image processing techniques, while modern approaches leverage deep learning architectures. Traditional techniques for image segmentation include methods like thresholding, clustering, partial differential

equation-based approaches, graph partitioning, watershed transformation, and so forth. These traditional segmentation techniques have widespread applications [1-3]. When we investigate current segmentation methods, we observe the utilization of convolutional neural networks [4-6] and Generative Adversarial Networks [7-9].

Generative Adversarial Networks (GANs), a deep learning algorithm, were proposed by Ian Goodfellow in 2014 for image synthesis [10]. GANs perform image synthesis in both supervised and unsupervised transformations. In the case of supervised transformation, it is necessary to have image pairs in two different domains. For learning the probability distribution, each input image is transformed into the corresponding output image in the other domain. In the literature, there are many studies using deep learning methods for semantic segmentation of aerial images.

In 2015, Saito et al., used CNN (Convolutional neural network) to train pixel labeling of building areas for the purpose of determining the semantic segmentation of aerial images, using Dijkstra's algorithm [11]. In 2018, Chen et al., proposed the periodic shuffling of aerial images for semantic segmentation, contributing to improving the field of view [12]. This model achieved effective results for two different datasets. In 2020, Chai et al., proposed a semantic

segmentation model with Deep CNNs (DCNNs) to learn spatial context from high-resolution aerial images [13]. This model predicted distance maps to improve segmentation efficiency. In 2021, Abdollahi et al., proposed a GAN method for segmenting roads in high-resolution aerial images [14]. This model also used a modified UNet model (MUNet) to achieve satisfactory results. In 2021, Wang et al. designed a real-time semantic segmentation model for high-resolution aerial images called the Aerial-BiseNet [15]. Aerial-BiseNet used two modules called the "Feature Attention Module (FAM)" and the "Channel Attention-based Feature Fusion Module (CAFFM)" to analyze features.

In 2022, Koç and Özyurt proposed an examination of synthetic images produced with DCGAN based on the size of data and epoch [16]. The results indicated that the success of the generated fraudulent images was directly proportional to the number of data and the increase in epoch. In 2021, Şahin and Talu conducted a performance comparison of Generative Adversarial Networks (GANs) in mustache pattern generation [17]. They utilized GAN architectures, including Pix2Pix, CycleGAN, DiscoGAN, and AttentionGAN. The study revealed that the generation speed of mustache patterns dropped below one second, while the production accuracy reached levels around 86%. In 2023, Şener and Ergen proposed "Enhancing Image Classification Performance through Discrete Cosine Transformation on Augmented Facial Images using GANs" [18]. The study found that the classification of faces could be improved by 30% compared to the normal classification model.

In 2022, Desai and Ghose suggested an active learning-based sampling strategy to select a highly representative labeled training dataset. Their proposed method resulted in a 27% improvement in mIoU with only 2% labeled data on two semantic segmentation datasets, including satellite images [19]. In 2022, Abdelfattah et al. introduced a simple yet effective method called PLGAN (Generative Adversarial Networks for Power-Line Segmentation in Aerial Images) to segment power lines from aerial images with different backgrounds. PLGAN, instead of directly using adversary networks to create segmentations, takes specific decoding features and places them in another semantic segmentation network, considering more context, geometry, and appearance information of power lines [20]. Comprehensive experiments and analyses showed that PLGAN outperformed previous state-of-the-art methods.

In this study, the iSAID dataset was used for semantic segmentation of aerial images. Recently, in 2023, Zhou et al. [21] proposed a Weakly Supervised Semantic Segmentation (WSSS) method. When dealing with Remote Sensing (RS) images with complex backgrounds and multiple categories, it can be challenging to locate and distinguish the target categories. Based on extensive experiments, their WSSS framework has shown superiority over RS datasets and has become the first WSSS framework to achieve state-of-the-art results on the iSAID dataset, exploring cross-image semantics in multi-category RS scenes using only image-level labels.

In this study, semantic segmentation of the two-dimensional iSAID images was compared among state-of-the-art GAN architectures, including CycleGAN [22], DCLGAN [23], SimDCL [23], and SSimDCL [24]. Metric comparisons revealed that the recent SSimDCL method outperformed other methods in semantic segmentation, providing more superior and satisfactory results. It was observed that this method could be used as an automatic image segmentation system.

The main contributions of this study can be summarized as follows:

- Comparison of state-of-the-art GAN architectures, including CycleGAN, DCLGAN, SimDCL, and SSimDCL, for semantic segmentation of two-dimensional iSAID images.
- Observing that the SSimDCL method provides superior and satisfactory results in semantic segmentation when compared to other methods.
- SSimDCL method has the potential to be used as an automatic image segmentation system.
- It introduces a new perspective on conducting semantic segmentation analysis for object detection in aerial images.
- The study observed the results of the new and highly accurate SSimDCL model by transforming unsupervised image segmentation methods from state-of-the-art models into supervised ones.

These contributions highlight the advancement in the field of semantic segmentation for two-dimensional aerial images using GAN architectures, particularly the effectiveness of the SSimDCL method.

The remaining organization of the article is as follows: In Section 2, materials and methods (CycleGAN, DCLGAN, SimDCL, and SSimDCL) are presented; Section 3 discusses experimental studies and their results; Section 4 provides a discussion and conclusion to conclude the article.

Materials and Methods

Used Dataset

The iSAID (A Large-scale Dataset for Semantic Segmentation in Aerial Images) is a dataset [25]. Existing Earth Vision datasets are suitable for semantic segmentation or object detection. iSAID, for instance, is the first benchmark dataset for segmentation in aerial images. This large-scale and densely annotated dataset contains 655,451 object instances across 15 categories in 2,806 high-resolution images. The distinctive features of the iSAID dataset are as follows:

- A large number of images with high spatial resolution,
- 15 important and commonly occurring categories,
- Numerous examples per category,
- A substantial number of labeled examples per image that can assist in learning contextual information,
- Significant variations in object scale, including small, medium, and large objects within the same image,
- An unequal distribution of objects in different directions in images depicting real-world weather conditions,
- A few small-sized objects with uncertain appearances that can only be resolved through contextual reasoning,
- Precise annotations are available at the example level, cross-checked and verified by expert annotators following well-defined guidelines, and conducted by professional annotators.

These distinctive features make the iSAID dataset a valuable resource for semantic segmentation and object detection in aerial images.

In this study, the semantic segmentation images shown in Fig. 1 were utilized. The training dataset consisted of 1302 real images and 1302 corresponding ground truth images used for semantic segmentation. The test dataset included 109 real images, and it was used to obtain the results of semantic segmentation. These are 109 images captured from the air. The aerial images consist of a variety of scenes

including roads, vehicles, rivers, airports, and seaports. The segmented results mainly focus on vehicles such as cars, trucks, and ships. Randomly selected training and test data were used in the iSAID dataset. The aim of this article is to perform automatic segmentation on the dataset. The image dimensions were resized to $256 \times 256 \times 3$ within the code for analysis.

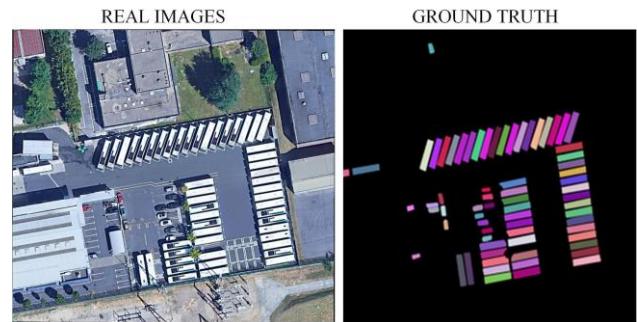


Figure 1. iSAID dataset image sample

Training Details

In the DCLGAN, SimDCL, and SSimDCL architectures, there are two generator networks, two feature-extracting layers, and two discriminator networks. In the CycleGAN architecture, there are two generator networks and one discriminator network. In this study, the internal structures of these methods include the same network content. The difference lies in the properties and numbers of the networks present in each method.

Fig. 2 illustrates the internal structure of the discriminator network. The discriminator network employs the PatchGAN architecture. Fig. 3 depicts the network structure used for feature extraction and embedding of the image in the DCLGAN, SimDCL, and SSimDCL methods. Fig. 4 provides an overview of the generator network's structure and network layers.

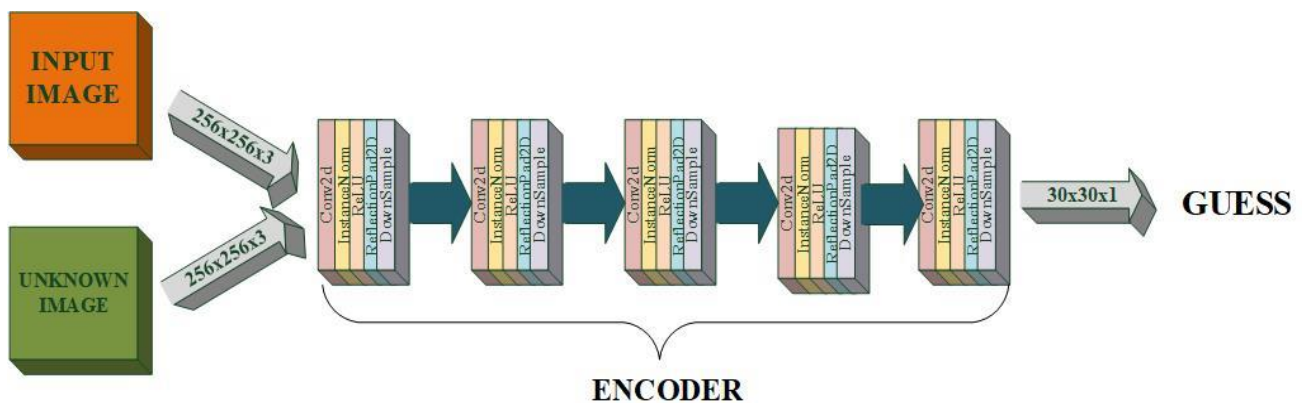


Figure 2. Discriminator Network Architecture

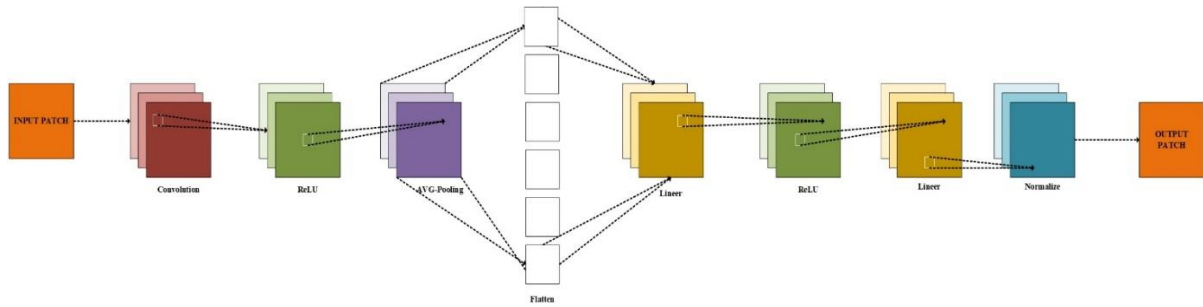


Figure 3. Feature Extracting Embedding Network Architecture

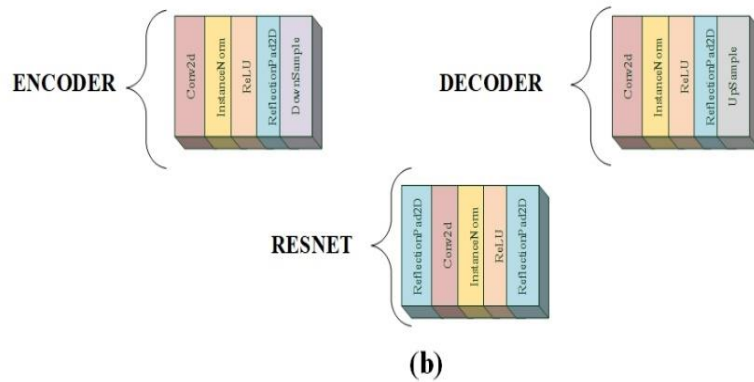
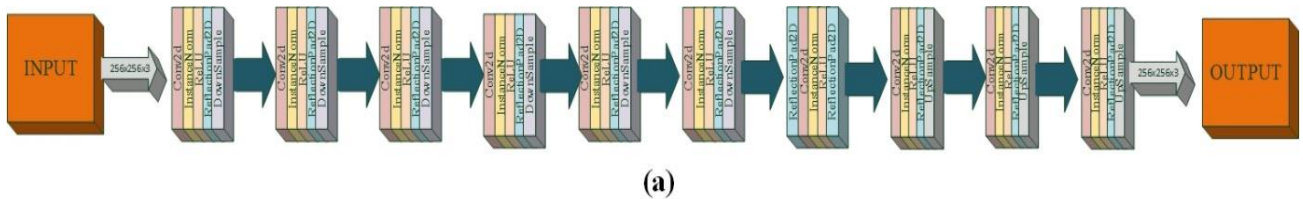


Figure 4. Generator Network Architecture (a) Inner Structure of the Network (b) Representation of Network Layers in the Inner Structure.

Image Segmentation Architectures

In this study, new segmentation architectures, namely CycleGAN [22], DCLGAN [23], SimDCL [23], and SSimDCL [23], have been utilized as segmentation architectures and extensively explained.

CycleGAN

CycleGAN [22] is a Generative Adversarial Network (GAN) architecture that employs bidirectional transformation. It utilizes two separate generative networks, denoted as $G: X \rightarrow Y$ and $F: Y \rightarrow X$, to convert an input image from the X domain into an output image in the Y domain, and vice versa. In the training process of this architecture, instance normalization is applied in lieu of batch normalization, and the generator network's internal design incorporates ResNET blocks. Figure 6 provides a visual representation of the overall structure of CycleGAN.

The loss function of CycleGAN consists of two distinct loss components: 1) cyclic consistency loss and 2) identity loss.

Cyclic Consistency Loss: When computing the cyclic loss, transformations $X \rightarrow G(X) \rightarrow Y' \rightarrow F(Y') \rightarrow \hat{X}$ and $Y \rightarrow F(Y) \rightarrow X' \rightarrow G(X') \rightarrow \hat{Y}$ are executed, and the aim is to minimize the summation of the difference values $X - \hat{X}$ and $Y - \hat{Y}$. The calculation of the cyclic loss is detailed in Table 1.

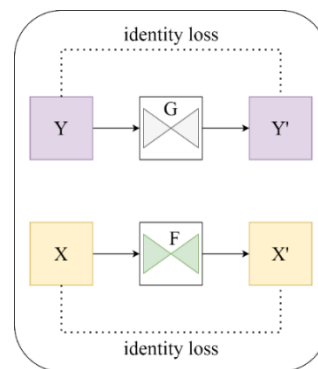


Figure 5. Identity Loss [24]

Identity Loss: When computing the transformations $X \rightarrow \hat{X}$ and $Y \rightarrow \hat{Y}$, intermediate outputs $X \rightarrow Y'$ and $Y \rightarrow X'$ are created. The purpose of these intermediate outputs is to closely resemble the original images. To perform this operation, it utilizes the F and G generative networks. Figure 5 illustrates the concept of identity loss. The identity loss is formulated as described in Table 1.

Furthermore, the errors in the discriminator architectures within the generative networks (\mathcal{L}_{GAN}^G and \mathcal{L}_{GAN}^F) are computed, contributing to the formation of the target function as detailed in Table 1 [22].

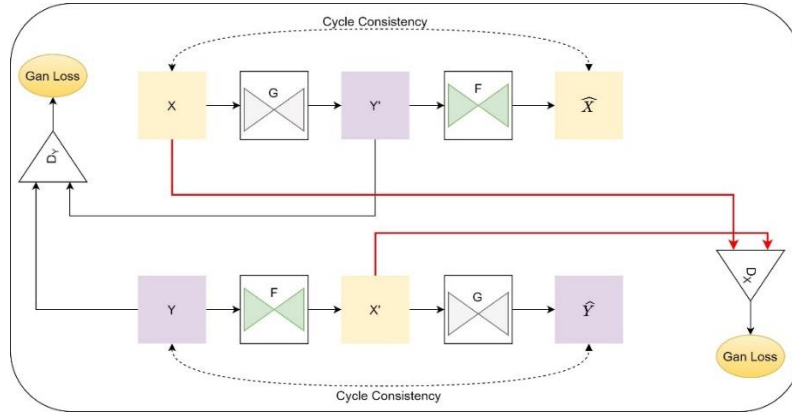


Figure 6. CycleGAN Architecture [24]

DCLGAN and SimDCL

DCLGAN [23] aims to enhance feature extraction between input and output image patches by utilizing two separate embedded systems to maximize mutual information. DCLGAN [23] seeks to maximize mutual information by improving feature extraction between input and output image patches through the use of two distinct embedded systems. The stability of this approach is enhanced through binary learning training. Certain design decisions for mutual learning have been assessed. In the implementation of the PatchNCE loss. The removal of RGB pixels corresponding to tiny patches has led to enhanced results. It has been demonstrated that enforcing cycle consistency is unnecessary. SimDCL [23] is a variant of DCLGAN that effectively mitigates mode collapse.

DCLGAN utilizes adversarial loss, identity loss, and patch-wise noise-contrastive estimation (PatchNCE) loss as its loss components. Furthermore, SimDCL incorporates similarity loss (\mathcal{L}_{sim}) to prevent mode collapse. The essential target function for DCLGAN is presented in Table 1.

A similarity loss has been integrated into the target function of DCLGAN, leading to the name SimDCL. In this context, "sim" signifies the similarity loss, while "DCL" signifies binary comparative learning. SimDCL incorporates this similarity loss (\mathcal{L}_{sim}) alongside the existing loss functions to mitigate mode collapse.

Similarity loss: In essence, images originating from the same domain exhibit certain resemblances. These images may possess distinct semantics but still exhibit a common stylistic element. In binary learning, there is one genuine and one synthetic image within the same field. There are

two domains, denoted as X and Y . In brief, the architecture comprises a total of two genuine and two synthetic images.

Utilizing a similarity loss on deep features promotes a resemblance between the generated images and real images at the deep feature level. This, in turn, makes the generated images more lifelike." In Table 1, the target function for SimDCL is provided. Figure 7 depicts the DCLGAN and SimDCL architectures.

SSimDCL

SSimDCL [24] utilizes two embedded systems To improve mutual information. In place of using unmatched images during the training process, matched images are employed. The objective is to transform the architecture into a supervised and matched state. To accomplish this, an L_1 metric is introduced between real and generated images within the SSimDCL framework.

SSimDCL [24] employs adversarial loss, identity loss, and patch-wise noise-contrastive estimation (PatchNCE) loss, which is also applied in the CUT method, as loss functions. It also incorporates a similarity loss (\mathcal{L}_{sim}), similar to SimDCL, to mitigate mode collapse. Moreover, in contrast to other techniques, it includes an L_1 loss to measure the difference between real and generated images.

When looking at the training results of the SSimDCL method, it is observed that the identity results in higher-resolution generated images compared to real images [24]. The method that is transformed into supervised learning and works on matched images closely resembles real images.

L_1 loss: In order to add a more supervised aspect to the unsupervised system, it is computed between the genuine image and the generated image. The specific calculations

for the L_1 loss can be found in Table 1. The target function for the SSimDCL method is also presented in Table 1.

Fig. 8 illustrates the architecture of SSimDCL. SSimDCL results in less pixel loss and higher resolution in the images

generated with $\mathcal{L}_{identity}(G, F)$ loss. The SSimDCL method has been employed to create a new dataset using the images generated with $\mathcal{L}_{identity}(G, F)$ loss.

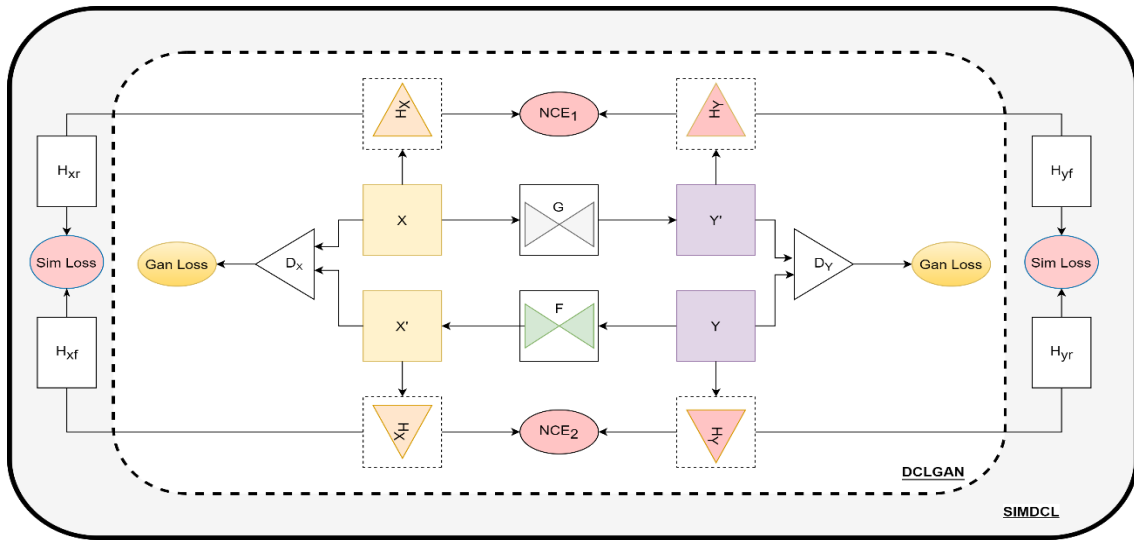


Figure 7. DCLGAN and SimDCL architecture [24]

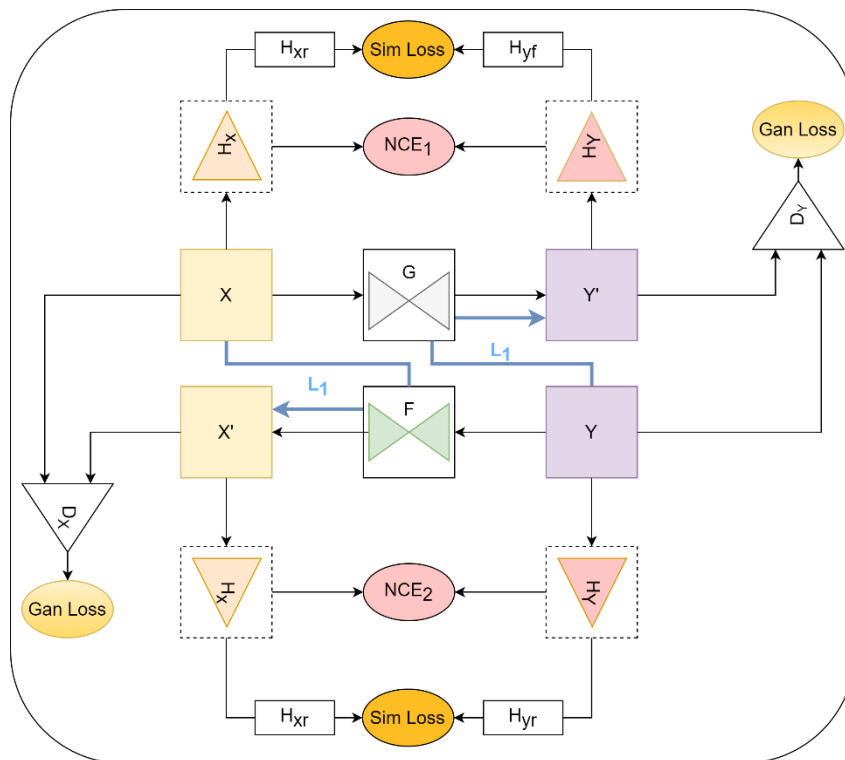


Figure 8. SSimDCL architecture[24]

Table 1. GAN Methos and Target Function

GAN methods	Target Function
CYCLEGAN [22]	$\mathcal{L}_{cyc} = X - \hat{X} + Y - \hat{Y} $ $\mathcal{L}_{identity} = L_1(G(Y) - Y) + L_1(F(X) - X)$ $G^*, F^* = \underset{G, F}{\operatorname{argmin}} \underset{D_X, D_Y}{\operatorname{max}} \mathcal{L}(G, F, D_X, D_Y)$ $= \mathcal{L}_{GAN}^G(G, D_Y, X, Y) + \mathcal{L}_{GAN}^F(F, D_X, Y, X)$ $+ \lambda \left(\mathcal{L}_{cyc}(G, F, X, Y) + \mathcal{L}_{identity}(G, F, X, Y) \right)$
DCLGAN [23]	$G^*, F^* = \underset{G, F}{\operatorname{argmin}} \underset{D_X, D_Y}{\operatorname{max}} \mathcal{L}(G, F, D_X, D_Y, H_X, H_Y)$ $= \lambda_{GAN} \left(\mathcal{L}_{GAN}^G(G, D_Y, X, Y) + \mathcal{L}_{GAN}^F(F, D_X, Y, X) \right)$ $+ \lambda_{NCE} \left(\mathcal{L}_{PatchNCE_X}(G, H_X, H_Y, X) \right)$ $+ \mathcal{L}_{PatchNCE_Y}(F, H_X, H_Y, Y)$ $+ \lambda_{idt} \left(\mathcal{L}_{identity}(G, F) \right)$
SimDCL [23]	$G^*, F^* = \underset{G, F}{\operatorname{argmin}} \underset{D_X, D_Y}{\operatorname{max}} \mathcal{L}(G, F, D_X, D_Y, H_X, H_Y)$ $= \lambda_{GAN} \left(\mathcal{L}_{GAN}^G(G, D_Y, X, Y) + \mathcal{L}_{GAN}^F(F, D_X, Y, X) \right)$ $+ \lambda_{NCE} \left(\mathcal{L}_{PatchNCE_X}(G, H_X, H_Y, X) \right)$ $+ \mathcal{L}_{PatchNCE_Y}(F, H_X, H_Y, Y)$ $+ \lambda_{sim} \mathcal{L}_{sim}(G, F, H_X, H_Y, H_{xr}, H_{xf}, H_{yr}, H_{yf})$ $+ \lambda_{idt} \mathcal{L}_{identity}(G, F)$
SSimDCL [24]	$G^*, F^* = \underset{G, F}{\operatorname{argmin}} \underset{D_X, D_Y}{\operatorname{max}} \mathcal{L}(G, F, D_X, D_Y, H_X, H_Y)$ $= \lambda_{GAN} \left(\mathcal{L}_{GAN}^G(G, D_Y, X, Y) + \mathcal{L}_{GAN}^F(F, D_X, Y, X) \right)$ $+ \lambda_{NCE} \left(\mathcal{L}_{PatchNCE_X}(G, H_X, H_Y, X) \right)$ $+ \lambda_{NCE} \mathcal{L}_{PatchNCE_Y}(F, H_X, H_Y, Y)$ $+ \lambda_{sim} \mathcal{L}_{sim}(G, F, H_X, H_Y, H_{xr}, H_{xf}, H_{yr}, H_{yf})$ $+ \lambda_{idt} \left(\mathcal{L}_{identity}(G, F) + \mathcal{L}_{identity}(G, F, X, Y) \right)$

Here $\lambda_{GAN} = 1$, $\lambda_{NCE} = 2$ and $\lambda_{sim} = 10$ and $\lambda_{idt} = 1$ are the hyperparameters used in the method.

Image Quality Metric

Inception Distance (FID) [26] assesses the similarity between the distribution of real images and that of generated images.

Kernel Inception Distance (KID) [27] is akin to FID but relies on the Mean Squared Error (MSE) between the generated and genuine images. KID offers an advantage over FID as it incorporates the ReLU activation function.

Feature Similarity Index Measurement (FSIM) [28] compares the phase consistency and gradient magnitude features of image pairs.

The Structural Similarity Index Metric (SSIM) [29] uses several simple statistical moments such as the mean (μ) and

standard deviation (σ) of image pairs to obtain a similarity score.

Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) [30] is the prevailing objective measurement for assessing the quality of image signals. However, PSNR values do not correlate well with perceived image quality due to the complex, highly nonlinear nature of the human visual system.

Structure Co-Occurrence Texture (SCOOT) [31] uses the Scoot metric to measure the similarity between real and synthesized images. SCOOT provides results that are very close to human perception. It systematically evaluates different texture-based/edge-based features in the Scoot architecture.

In terms of measurement metrics, higher values indicate better results for SCOOT [31], FSIM [28], SSIM [29], and PSNR [30]. For FID [26] and KID [27], lower values indicate better results.

Application Environment and Experimental Setup

The application was trained on an NVIDIA® GeForce® RTX 4060 Max-Performance 8GB GDDR6 128-Bit DX12 graphics card with a power of 115 watts + 25 watts for Dynamic Boost 2.0. The system also used an Intel® Raptor Lake Core™ i7 processor.

Work has been conducted on the Python programming language using PyCharm and Anaconda IDEs. Within the environment, Python 3.7 and the following libraries have been utilized: torch, torchvision, dominate, visdom, packaging, GPUutil, scipy, Pillow, and numpy.

All the methods were run in a Python environment with 300 iterations on a computer with an 8 GB GPU. The measurement metrics used in the evaluation included the classic GAN methods FID [26] and KID [27], and the traditional method FSIM [28], SSIM [29], PSNR [30], SCOOT [31].

For training GAN methods, the settings of DCLGAN [23] were used as a reference. The hyperparameters used in these settings are shown in Table 2. The training process utilized the Adam optimization method [32]. The generative network was based on ResNet [33], and a PatchGAN [34] discriminator was used. Semantic normalization was also applied.

Table 2. Training Details

	β_1	β_2	Epoch	Lr	Batch Size	Image Size
Training hyperparameter	0.5	0.999	300	0.0001	1	256 × 256

Experimental Results

Fig. 9 displays the visual results of CycleGAN, DCLGAN, SimDCL, and SSimDCL methods in the context of iSAID

semantic segmentation. When comparing the visual output results of semantic segmentation on iSAID images, it is observed that SimDCL and SSimDCL methods provide the best results.

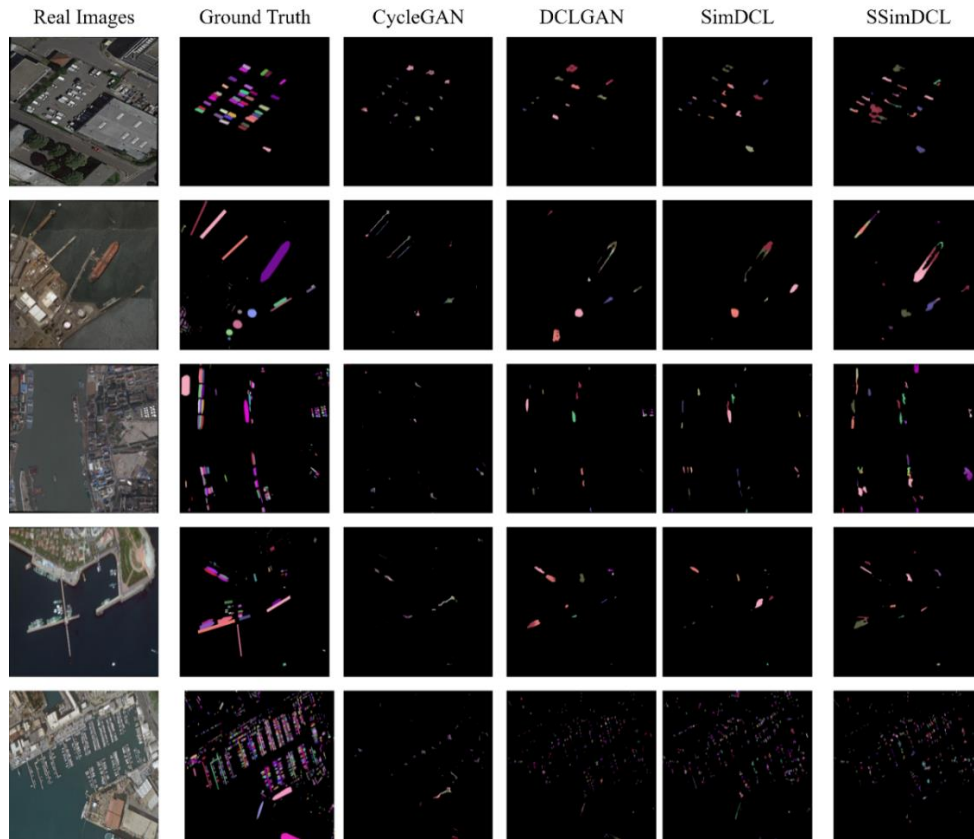


Figure 9. Visual results of the methods for semantic segmentation

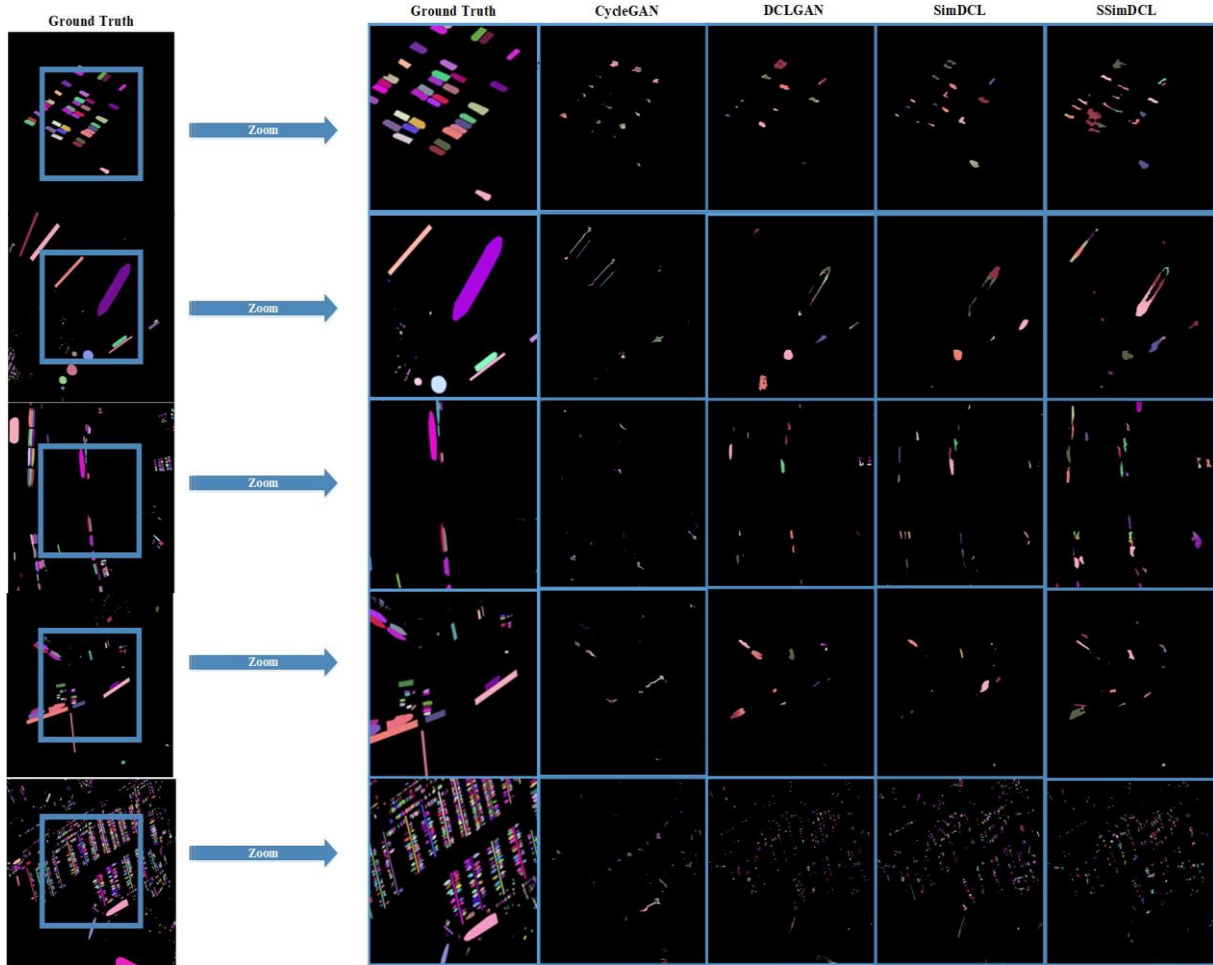


Figure 10. iSAID image semantic segmentation analysis according to the methods. Original image size (256 × 256 × 3). , Zoomed-in view of the colored regions shown in first column.

Table 3. Image Similarity Metrics Results

	FID↓	KID↓	SCOOT↑	PSNR↑	SSIM↑	FSIM↑
CYCLEGAN[22]	202.33857	0.16795	0.53218	0.83408	35.7062	0.7751
DCLGAN [23]	164.83025	0.12890	0.5980	0.85089	37.5326	0.82128
SimDCL [23]	<u>149.82306</u>	<u>0.10215</u>	<u>0.60142</u>	<u>0.85224</u>	<u>37.4747</u>	<u>0.82429</u>
SSimDCL [24]	132.62071	0.07825	0.6406	0.85973	37.862	0.82725

Table 3 shows the bold font indicating the first successful method, and the underlined font indicating the second successful method. Metrically, the lower the FID and KID, the higher the performance rate. Among the examined methods, the SSimDCL method achieved the highest success with the lowest FID of 132.32071 and KID of 0.07825; the SimDCL method secured the second position

with FID of 149.82306 and KID of 0.10215, while the CycleGAN method was observed to be the least successful with FID of 202.33857 and KID of 0.16795.

In terms of SCOOT, PSNR, SSIM, and FSIM, the higher the values, the better the performance. Among the examined methods, the SSimDCL method ranked first with the lowest

0.6406 SCOOT, 0.85973 PSNR, 37.862 SSIM, and 0.82725 FSIM; the SimDCL method secured the second position with 0.60142 SCOOT, 0.85224 PSNR, 37.4747 SSIM, and 0.82429 FSIM. The CycleGAN method, with 0.53218 SCOOT, 0.83408 PSNR, 35.7062 SSIM, and 0.7751 FSIM, was observed to be the least successful among the examined methods.

When examining Table 3, it can be observed that according to the image similarity metrics FID, KID, SCOOT, PSNR, SSIM, and FSIM, the method most similar to the Ground Truth image is SSimDCL (indicated in bold). SimDCL (indicated with an underline) follows in the second place, and the DCLGAN method ranks third. When looking at the image measurement metric results, the CycleGAN method appears to be less successful compared to the other methods.

Discussion and Conclusion

The main subject of this article is to compare the efficiency of methods that initially use the CycleGAN method, which is commonly used in the problem of image semantic segmentation. The CycleGAN method has been modified to develop new GAN architectures, namely DCLGAN and SimDCL. The SSimDCL method is derived from the SimDCL method. The iSAID dataset is used for evaluating the visual semantic segmentation efficiency of CycleGAN, DCLGAN, SimDCL, and SSimDCL methods.

When looking at the metric results, the SSimDCL method ranks first with 132.62071 FID, 0.07825 KID, 0.6406 SCOOT, 0.85973 PSNR, 37.862 FSIM, and 0.82725 SSIM; the SimDCL method shows the second-best performance with 149.82306 FID, 0.10215 KID, 0.60142 SCOOT, 0.85224 PSNR, 37.4747 FSIM, and 0.82429 SSIM. The CycleGAN method, on the other hand, ranks last among the applied methods with results of 202.33857 FID, 0.16795 KID, 0.53218 SCOOT, 0.83408 PSNR, 35.7062 FSIM, and 0.7751 SSIM.

When examining the visual results of the compared methods, it is observed that SimDCL and SSimDCL methods achieved the best results. CycleGAN, on the other hand, was found to be less effective in segmentation compared to the other methods. Looking at the results with image evaluation metrics in Table 3, it can be observed that SSimDCL and SimDCL methods have produced the best results, in that order. According to Table 3, it can be observed that the CycleGAN method received lower metric results compared to the other methods. As a result of this study, it can be said that SSimDCL and SimDCL can be used for instance segmentation and achieve more efficient results.

References

- [1] R. S. A. V. K. V. Shrimali, "Current trends in segmentation of medical ultrasound B-mode images: A review," *IETE Tech. Rev.*, cilt 1, no. 817, ss. 26, 2009.
- [2] G. Hu and Mageras, "Survey of recent volumetric medical image segmentation techniques," *Biomedical Engineering, Vukovar, Croatia: In-Tech*, ss. 3216, 2009.
- [3] A. A. Taha and A. Hanbury, "Metrics for evaluating 3D medical image segmentation: analysis, selection, and tool," *BMC medical imaging*, cilt 15, no. 1, ss. 1-28, 2015.
- [4] G. Wang, W. Li, M. A. Zuluaga, R. Pratt, P. A. Patel, M. Aertsen et al., "Interactive medical image segmentation using deep learning with image-specific fine tuning," *IEEE transactions on medical imaging*, cilt 37, no. 7, ss. 1562-1573, 2018.
- [5] Z. Gu, J. Cheng, H. Fu, K. Zhou, H. Hao, Y. Zhao et al., "Ce-net: Context encoder network for 2d medical image segmentation," *IEEE transactions on medical imaging*, cilt 38, no. 10, ss. 2281-2292, 2019.
- [6] B. Kayalibay, G. Jensen and P. van der Smagt, "CNN-based segmentation of medical imaging data," *arXiv preprint arXiv:1701.03056*, 2017.
- [7] Y. Xue, T. Xu, H. Zhang, L. R. Long, X. Huang, "SegAN: Adversarial Network with Multi-scale L1 Loss for Medical Image Segmentation," *Neuroinformatics*, cilt 16, ss. 383-392, 2018.
- [8] N. Khosravan, A. Mortazi, M. Wallace, and U. Bagci, "Pan: Projective adversarial network for medical image segmentation," *Proceedings of the International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, ss. 68-76, 2019.
- [9] M. Zhao, L. Wang, J. Chen, D. Nie, Y. Cong, S. Ahmad et al., "Cranio-maxillofacial bony structures segmentation from MRI with deep-supervision adversarial learning," *Proceedings of the International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, ss. 720-727, 2018.
- [10] I. Goodfellow, J. Pouget-Abadie, M. Mirza, B. Xu, D. Warde-Farley, S. Ozair et al., "Generative adversarial nets," *Advances in neural information processing systems*, ss. 2672-2680, 2014.
- [11] S. Saito, R. Arai and Y. Aoki, "Seamline determination based on semantic segmentation for aerial image mosaicking," *IEEE Access*, cilt 3, ss. 2847-2856, 2015.
- [12] B. Yu, L. Yang and F. Chen, "Semantic segmentation for high spatial resolution remote sensing images based on convolution neural network and pyramid pooling module," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, cilt 11, no. 9, ss. 3252-3261, 2018.
- [13] D. Chai, S. Newsam and J. Huang, "Aerial image semantic segmentation using DCNN predicted distance maps," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, cilt 161, ss. 309-322, 2020.
- [14] A. Abdollahi, B. Pradhan, G. Sharma, K. N. A. Maulud and A. Alamri, "Improving road semantic segmentation using generative adversarial network," *IEEE Access*, cilt 9, ss. 64381-64392, 2021.
- [15] F. Wang, X. Luo, Q. Wang and L. Li, "Aerial-BiSeNet: A real-time semantic segmentation network

- for high resolution aerial imagery," Chinese Journal of Aeronautics, cilt 34, no. 9, ss. 47–59, 2021.
- [16] C., KOÇ., & F. Özyurt., An examination of synthetic images produced with DCGAN according to the size of data and epoch. *Firat University Journal of Experimental and Computational Engineering*, 2(1), 32-37, 2023.
- [17] E. Şahin., & Talu, M. F. Talu, Bıyık Deseni Üretiminde Çekişmeli Üretici Ağların Performans Karşılaştırması. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(4), 1575-1589, 2022.
- [18] A., ŞENER, & B. ERGEN, Enhancing Image Classification Performance through Discrete Cosine Transformation on Augmented Facial Images using GANs. *Computer Science, (IDAP-2023)*, 7-18, 2023.
- [19] S. Desai and D. Ghose, "Active learning for improved semi-supervised semantic segmentation in satellite images," *Proceedings of the IEEE/CVF winter conference on applications of computer vision*, ss. 553-563, 2022.
- [20] R. Abdelfattah, X. Wang and S. Wang, "Pigan: Generative adversarial networks for power-line segmentation in aerial images," *arXiv preprint arXiv:2204.07243*, 2022.
- [21] R. Zhou, Z. Yuan, X. Rong, W. Ma, X. Sun, K. Fu et al., "Weakly Supervised Semantic Segmentation in Aerial Imagery via Cross-Image Semantic Mining," *Remote Sensing*, cilt 15, no. 4, ss. 986, 2023.
- [22] J. Y. Zhu, T. Park, P. Isola and A. A. Efros, "Unpaired image-to-image translation using cycle-consistent adversarial networks," *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, ss. 2223-2232, 2017.
- [23] J. Han, M. Shoeiby, L. Petersson and M. A. Armin, "Dual Contrastive Learning for Unsupervised Image-to-Image Translation," *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, ss. 746-755, 2021.
- [24] S. A. Güven and M. F. Talu, "Brain MRI high resolution image creation and segmentation with the new GAN method," *Biomedical Signal Processing and Control*, cilt 80, ss. 104246, 2023.
- [25] S. Waqas Zamir, A. Arora, A. Gupta, S. Khan, G. Sun, F. Shahbaz Khan et al., "iSAID: A large-scale dataset for instance segmentation in aerial images," *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, ss. 28-37, 2019.
- [26] M. Heusel, H. Ramsauer, T. Unterthiner et al., "Gans trained by a two time-scale update rule converge to a local nash equilibrium," *Advances in neural information processing systems*, cilt 30, 2017.
- [27] M. Bińkowski, D. J. Sutherland, M. Arbel and A. Gretton, "Demystifying mmd gans," *arXiv preprint arXiv:1801.01401*, 2018.
- [28] L. Zhang, L. Zhang, X. Mou et al., "FSIM: A feature similarity index for image quality assessment," *IEEE transactions on Image Processing*, cilt 20, no. 8, ss. 2378-2386, 2011.
- [29] Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh et al., "Image quality assessment: from error visibility to structural similarity," *IEEE transactions on image processing*, cilt 13, no. 4, ss. 600-612, 2004.
- [30] PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio), *IEEE transactions on Image Processing*, cilt 20, no. 8, ss. 2378-2386, 2011.
- [31] D. P. Fan, S. C. Zhang, Y. H. Wu et al., "Scoot: A perceptual metric for facial sketches," *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, 2019, ss. 5612-5622.
- [32] Diederik P. Kingma and Jimmy Ba, "Adam: A method for stochastic optimization," *International Conference on Learning Representations (ICLR)*, 2014.
- [33] Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren and Jian Sun, "Deep residual learning for image recognition," *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, sayfalar 770-778, 2016.
- [34] Phillip Isola, Jun-Yan Zhu, Tinghui Zhou and Alexei A. Efros, "Image-to-image translation with conditional adversarial networks," *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2017.



The Effect of Latent Space Vector on Generating Animal Faces in Deep Convolutional GAN: An Analysis

İsa ATAŞ*

Dicle University, Computer Technologies Department, isa_atas@dicle.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-4094-9598

ARTICLE INFO

Article history:

Received 21 November 2023
Received in revised form 7 March 2024
Accepted 19 March 2024
Available online 29 March 2024

Keywords:

deep learning, FID, GAN, image generation, IS, latent space

Doi: 10.24012/dumf.1393797

* Corresponding author

ABSTRACT

Researchers are showing great interest in Generative Adversarial Networks (GANs), which use deep learning techniques to mimic the content of datasets and are particularly adept at data generation. Despite their impressive performance, there is uncertainty about how GANs precisely map latent space vectors to realistic images and how the chosen dimensionality of the latent space affects the quality of the generated images. In this paper, we explored the potential of generative models in generating animal face images. For this purpose, we used the Deep Convolutional Generative Adversarial Network (DCGAN) model as a reference. To analyze the impact of selected latent space vectors, we synthesized animal face images by training data representations in the DCGAN model with the well-known AFHQ dataset from the literature. We compared the quantitative evaluation of the produced images using Fréchet Inception Distance (FID) and Inception Score (IS). As a result, we demonstrated that generative models can produce images with latent sizes significantly smaller and larger than the standard size of 100.

Introduction

With the advancement of artificial intelligence, deep learning have successfully used in various fields, including healthcare [1], hyperspectral imaging [2], and remote sensing [3], [4]. One of the main challenges in deep learning is collecting data and scaling the data for training purposes. GANs [5], which consist of two competing players: a Generator model that produces image or audio data from random noise input and a Discriminator model that classifies real and generated data, can help address this problem by generating synthetic data for data augmentation. Generative models focus on capturing the generalization ability of the model and allow sampling from the learned distribution from training, and the statistical distribution, respectively. The Generator maps from a latent space Z (a hidden space data) to X (real image data), while the Discriminator identifies whether the generated output is real or fake. GANs are very interesting due to their ability to explore the structure of the hidden space and to generate realistic data in the problem area and can help develop an intuition for what the generator model has learned. In the proposed approach, they provided a better solution than the known StyleMapping network while maintaining state-of-the-art image quality. In this study, the DCGAN [6] model,

a variant of GANs known to produce realistic and high quality images, is taken as a reference. An empirical comparison of commonly used quantitative and qualitative evaluation techniques is made, considering various latent dimensions and learned data distributions. The relationship between the semantic features exhibited in images generated by GANs and the latent codes of different generator models has been studied in many works. Hwang [7] analyzed the impact of the selected latent space dimension of an automatic encoder on the final performance. Ayvaz and Baytaş [8] proposed a deep learning model to analyze variables that are determinants of the transformation from Mild Cognitive Impairment (MCI) to Alzheimer's disease. Using a generative decoder and Alzheimer's dementia-inducing dimensions, they created synthetic dementia patient images from MCI patients were generated. They obtained promising quantitative and qualitative results with their data sets. In their study, Shimizu et al. [9] investigated the connection between latent vectors and human perception or cognition through psycho-visual analysis affecting the latent vectors of human faces. In the perception study, they examined whether subjects could perceive visuals in facial images before and after changes in the latent space. In the cognition study, they analyzed whether participants could recognize a

face as similar even after latent field changes. In their experiments, they showed that the distance between facial images in latent space is related to human perception and cognition of visual changes. Zhang and Schomaker [10] focused on the problems of how to ensure that the samples produced are realistic, how to take advantage of the latent space of the generator to adjust a synthesized image, and how to explain the text to image conversion layers. They used Good/Bad human face and bird images as data sets. They presented an algorithm that identifies semantically identifiable sides in the latent space of a conditional text-to-image GAN architecture by performing unbiased component analysis using the generator's pre-trained weight values. They achieved better than 98% accuracy in predicting good/bad classes for synthetic samples. Ntavelis et al. [11] proposed a separate latent space propagation for Generative Adversarial Networks (GANs). Instead of drawing latent vectors, they sampled from a finite set of elements. They developed this approach inspired by the coding of data in biological organisms.

Our main contribution in this research is as follows:

- Firstly, we conduct comparative analyses on animal face image datasets using the DCGAN model, which is a popular variant of GANs for synthetic image generation.
- Secondly, we provide a detailed explanation of the DCGAN model in the field of image synthesis and critically evaluate its performance.
- Thirdly, we qualitatively compare the impact of different dimensions of the latent space on the image quality produced by DCGAN by analyzing datasets with different latent space dimensions.
- Finally, we evaluate the potential use of optimized FID and IS metrics for assessing the quality of natural animal face images.

This paper is structured as follows: Section 2 presents the characteristics of the datasets, the GAN model used, the experimental setups and the analysis of the experimental results. Then, section 3 presents the evaluation metrics we use throughout the paper. Finally, in section 4, we discuss the results of the proposed model.

Methodology

Dataset

We used the publicly available AFHQ (Animal Faces High Quality) [12] dataset from Kaggle to evaluate the DCGAN model. This dataset includes a wide range of high-quality animal face photographs with diversity in breeds, ages, and genders to provide variation in online animal faces. It consists of over 15,000 images in total, with each of the three different animal species (cat, dog, and wildlife) contributing 5,000 images. All the images are aligned vertically and horizontally, with the eyes centered.

GAN and variant DCGAN

1. Generative Adversarial Network (GAN)

Goodfellow et al. [5] proposed GANs as a class of generative models. GANs are deep learning models that utilize two different artificial neural networks to learn by competing with each other and mimic the content of data

sets. During the training phase, they engage in a mutual competition and collaboration. The generator produces detailed synthetic (fake) data that completely fools the discriminator, while the discriminator generates penalty scores to distinguish between fake and original data. Both the generator and the discriminator strive to maximize their own success while minimizing the success of their opponent. This means that both networks are optimized to achieve their own objectives: the G-Generator must create realistic examples, while the D-Discriminator must be experienced in rejecting generator samples and accepting real examples. The generator aims to maximize the likelihood of its outputs (i.e., the fake data) being recognized as "real," while the discriminator aims to minimize the same value [5].

The training process of a GAN model is divided into two stages: Generator stage: The generator takes z latent noise data as input and generates some fake example data, which is then passed to the discriminator. At the beginning, the generator does not know how to generate the actual data because it has never seen it before. However, the discriminator updates its parameters and computes the cost, which then backpropagates the gradients to update the generator's parameters. Discriminator stage: The discriminator is structurally a binary classifier. It receives input data (real and fake) without prior knowledge about the quality of correct or incorrect data. As output, it calculates the probability of the data generated by the generator being true or false [13]. The GAN architecture is shown in Fig. 1.

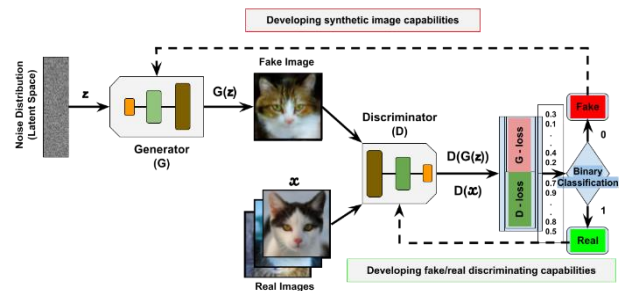


Figure 1. Architecture of the GAN.

The generator aims to map the latent space data Z to the real image data X , while the discriminator tries to determine whether the generated output is real or fake. These two neural networks, with the objective function $V(D, G)$ given in equation 1, compete with each other during training to optimize their opposing loss functions. The objective function helps balance the competition between these two networks and assists the GAN in producing desired results.

$$\min_G \max_D V(D, G) = E_{x \sim P_{data}(x)} [\log D(x)] + E_{z \sim P_{data}(z)} [\log (1 - D(G(z)))] \quad (1)$$

As in the simultaneous training and learning process where two adversarial networks compete in a minmax game, the model can become noisy and unstable due to vanishing gradients, convergence error and mode collapse. For these reasons, GAN variants have been developed to overcome these problems.

2. Deep convolution GAN (DCGAN)

Fully connected layers tend to degrade the quality of generated images in GAN models. To address this issue, Radford et al. [6] proposed the DCGAN model, which introduces certain constraints to the topology of convolutional networks to enable the generation of high-quality images. They demonstrated that DCGAN contributes significantly to unsupervised learning and achieves state-of-the-art results on various image classification tasks. The DCGAN architecture replaces all pooling layers with strided convolutions in the discriminator model and transposed convolutions in the generator model. Additionally, it uses ReLU activation in all layers of the generator model, except for the last layer that uses TanH. However, it employs LeakyReLU activation function in all layers of the discriminator. The key components of the DCGAN model, which are simple and transposed convolutions used during the training phase, enable the GAN to learn excellent down sampling and up sampling operations. These upsampling operations help improve image synthesis [14]. Fig. 2, shows the important components in the generator and discriminator layers of the DCGAN model.

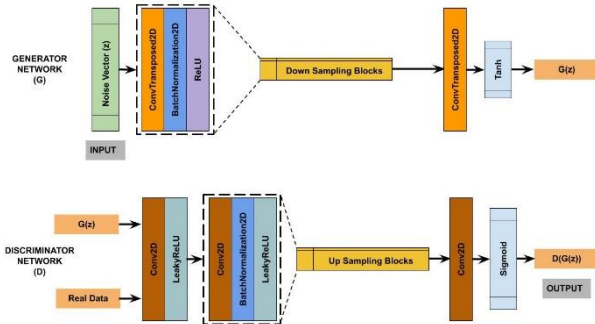


Figure 2. DCGAN model diagram.

Evaluation Techniques

Assessing the quality of GANs is important in deep learning research since it can potentially help make informed decisions such as which model to use, when to terminate training, and how to improve the model. Therefore, quantitative and qualitative evaluations are carried out to identify unintended training problems and to analyze how successfully the generator and discriminator achieve their respective goals. Quantitative evaluation involves using metrics such as IS, FID to assess the quality, diversity, and similarity of generated samples compared to real data. These metrics provide numerical measures that can be used to compare different GAN models or track the progress of a single model during training. Qualitative evaluation includes visual inspection of produced samples and human

judgment. The visual realism, clarity and consistency angle of the created images are examined carefully. Factors such as the presence of artifacts, mode collapse (where the generator produces only limited variations of the same sample) and overall image quality are also considered.

The Inception Score [15] and Fréchet Inception Distance [16] are widely preferred quantitative evaluation metrics that utilize the pre-trained InceptionV3 [17] network on the ImageNet dataset [18].

1. Inception Score (IS)

Inception Score (IS) is a metric used in machine learning to evaluate the quality of images created by generative models. Observing a produced image and making a visual assessment of the image is subjective and can vary greatly depending on the preferences and biases of the human viewer. IS is used to objectively measure the consistent performance of generated images, to determine the quality and capability of the generative model. The IS algorithm focuses on two factors; the quality of the created image and the variety of images produced. The IS algorithm equation is given in (2).

Here; $p(y|x)$ denotes the conditional probability distribution, the y index identifies the labeling sets, the x index identifies the generator sampled image. The score calculated with the IS algorithm can range from zero (worst) to infinite (best) [19].

$$\uparrow \text{IS}(G) = \exp(E_{x \sim p_g} D_{KL}[p(y|x) || p(y)]) \quad (2)$$

2. Fréchet Inception Distance (FID)

Fréchet Initial Distance (FID) is a metric used to evaluate the performance of generative models, as the IS algorithm. It measures the similarity of the generated images to the training images. The smaller the measurement index value, the better the structural consistency. The FID equation is provided in equation (3).

$$\downarrow \text{FID}(x, y) = \left\| \mu_x - \mu_y \right\|^2 + T_r(C_x + C_y - 2(C_x C_y))^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

where (μ_x, C_x) and (μ_y, C_y) indices represent the mean and linear dependence measure values of the real and produced image. A low FID score is desirable [16].

While quantitative approaches in GAN evaluation provide less subjective measures, they may not always align with human perception of the quality of generated images. To complement quantitative evaluation results and assess overfitting, qualitative evaluation methods can be used to gain a better understanding of the learned data representations and generalization ability of the model.

One such method is the nearest neighbors approach, which involves classifying or predicting samples based on their similarities to known data points in the training set. This provides insights into how well the generated samples align

with the characteristics of the real data and can offer a more intuitive assessment of image quality.

3. Nearest Neighbors

One way to check for overfitting in synthetic generated images is to visualize the generated images along with their nearest neighbors, which are the training images that are most similar to them. Nearest neighbors can be computed at the pixel level using similarity metrics such as Euclidean distance. However, one disadvantage of Euclidean distance is its sensitivity to small perturbations, such as shifting an image by a few pixels. As a result, GANs that produce transformed training data can pass such overfitting tests [20].

Experimental Results

Application Details

For the model training, we set the hyperparameters as follows: batch size = 64, initial weight = 0.02, image size = 64×64 , latent space noise vector = 1, 2, 4, 8, 100, 512, 1000, and epoch numbers = 100, 200, 350. We used the open CEZERİ Library (OCL) for image preprocessing [21]. Additionally, we used a learning rate of 0.0002 and the gradient-based Adam optimizer [22] with momentum $\beta_1 = 0.5$, $\beta_2 = 0.999$, known to converge faster during training. All experiments were conducted using the PyTorch open-source deep learning framework and implemented in the Python programming language. We performed the training and testing procedures in a server-based Google Colab environment equipped with 13,342 RAM and Tesla K80 and NVIDIA T4 GPUs for accelerated processing.

Quantitative Results

Initially, we evaluated the DCGAN empirically for the widely used [23] 100-dimensional hidden field by training it on the AFHQ dataset. Fig. 3 shows the results obtained for two quantitative assessment metrics, IS and FID, respectively. In Fig. 3, it can be observed that the AFHQ Wild dataset performs better in terms of the FID metric, while the AFHQ Dog dataset achieves better results in the IS metric when using the DCGAN model in a 100-dimensional latent space.

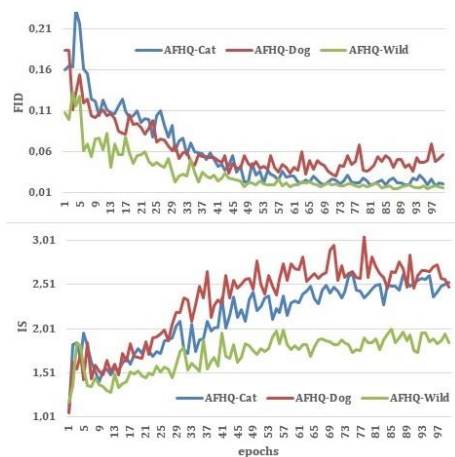


Figure 3. DCGAN evaluation scores for $\dim(z) = 100$.

The FID metric compares the similarity of synthetic images to real images, indicating that the DCGAN model produces more realistic images with the AFHQ Wild dataset. On the other hand, the IS metric evaluates image quality and diversity, and it is observed that the DCGAN model performs well with the AFHQ Dog dataset. To analyze the effect of different latent space dimensions on the DCGAN model, the AFHQ Cat dataset was used as a reference, and the DCGAN model was trained with latent dimensions ranging from 1 to 1000. In Fig. 4, we can observe how the FID and IS values change during training for seven different latent dimensions: $\dim(z) \in \{1, 2, 4, 8, 100, 512, 1000\}$. The FID value corresponding to the smallest latent dimension, $\dim(z) = 1$, is higher than the other six dimensions at all iterations, indicating poorer performance. Similarly, the IS value is lower than the other six dimensions at all iterations, also indicating poorer performance. The dimensionality of the latent space should typically be at a certain value that captures the complexity of the target data distribution [24].

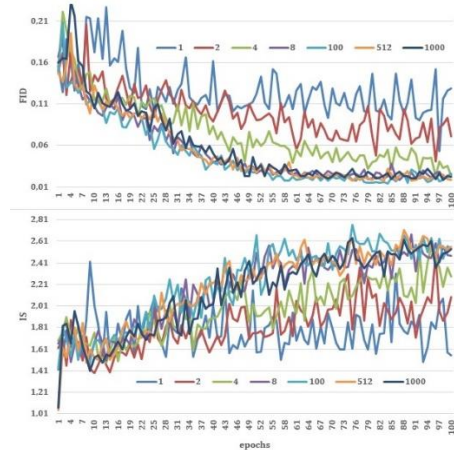


Figure 4. Quantitative results of AFHQ Cats.

In Fig. 4, it can also be observed that the AFHQ Cat dataset fails to capture the complexity at $\dim(z)$ values of 1, 2, and 4. A similar situation is observed for the AFHQ Dog and AFHQ Wild Animals datasets as well. Despite the significant difference between dimensions 8 and 1000, the FID and IS values intertwined during training, performing well as the Nash equilibrium was achieved. Higher dimensional latent spaces (100, 512, 1000) have the potential to capture more complex variations and details in the generated data, but they can also make training more challenging and computationally expensive. On the contrary, lower-dimensional latent spaces (1, 2, 4) may limit the complexity and diversity of the generated samples [24]. In the DCGAN model with the smallest latent space dimension trained on three datasets, instability and mode collapse were observed during GAN training due to insufficient latent space provided to the generator to generate features and limited ability to capture image features. As a result of mode collapse, the quantitative metric graphs of the generated synthetic images are shown in Fig. 5.

Mode collapse disrupts the stability of the DCGAN model, preventing the generation of high-quality and diverse images, resulting in FID and IS values exhibiting unstable fluctuations within a certain range.

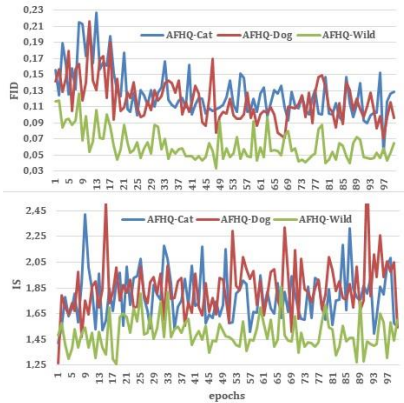


Figure 5. Evaluation scores for $\dim(z) = 1$.

Table 1. TOP-5 Documented FID Results Per Latent Dimension- AFHQ Cat.

FID	$\dim(z)$						
	1	2	4	8	100	512	1024
1.	0.148	0.083	0.033	0.025	0.021	0.024	0.043
2.	0.154	0.085	0.038	0.034	0.024	0.037	0.051
3.	0.177	0.087	0.040	0.043	0.027	0.045	0.057
4.	0.198	0.090	0.041	0.050	0.029	0.048	0.062
5.	0.203	0.096	0.047	0.063	0.032	0.053	0.066

Table 2. TOP-5 Documented IS Results Per Latent Dimension- AFHQ Cat.

IS	$\dim(z)$						
	1	2	4	8	100	512	1024
1.	1.551	2.091	2.287	2.475	2.586	2.537	2.324
2.	1.530	2.083	2.269	2.460	2.550	2.516	2.305
3.	1.493	2.045	2.244	2.451	2.523	2.498	2.288
4.	1.475	2.021	2.217	2.429	2.498	2.473	2.265
5.	1.453	2.004	2.189	2.391	2.462	2.460	2.246

Qualitative Results

Fig. 6 shows the generated images and the corresponding loss graphs produced by the DCGAN model trained with a 100-dimensional latent space over 100 epochs using 5000 images from each of the AFHQ Cat, AFHQ Dog, and AFHQ Wild Animals datasets. The process based on the generator and discriminator loss functions oscillates within a narrow range due to the effort to reach a Nash equilibrium, which is a situation where the discriminator cannot distinguish between real and fake images in a competitive system. However, achieving this balance is challenging due to the simultaneous training of the two adversarial networks. It can be observed in the loss graphs that the discriminator's loss decreases faster towards zero compared to the generator's loss. Upon examining the generated images (left) in Fig. 6, it can be observed that as the epochs increase, the Generator

Consequently, the generated images suffer from distortions or low diversity. In our experiments, we observed evident and pronounced errors in latent space dimensions of 1, 2, and 4. Taking into consideration the best FID and IS results obtained from Table 1, and Table 2 it can be said that the 4-dimensional model performs better overall compared to the 1-dimensional and 2-dimensional models.

Comparing different latent dimensions fairly and avoiding potential misleading conclusions that could arise from either mode collapse or convergence errors can help determine the final model that may be affected by one of these issues. Furthermore, for a more qualitative analysis of the latent space's impact on the image quality, the FID value with the lowest reference point and the IS value with the highest reference point can be chosen as representatives for a specific dimension.

manages to capture somewhat realistic images and deceive the Discriminator to some extent. When examining the loss functions (right) for all three shapes, it is evident that the Generator achieves the Nash equilibrium with the Discriminator earlier in the Cat and Dog datasets compared to the Wild dataset, demonstrating a more stable progress.

The delayed attainment of the Nash equilibrium in training the DCGAN with the Wild dataset suggests that the generator network struggles to capture the features of real data by utilizing the feature maps of the discriminative network based on images of four different animal species. Therefore, the loss function of the generator network oscillates in a wider range. In the training of DCGAN with the smallest latent space dimension, the generator lacks sufficient latent space to

generate meaningful features, leading to limited ability in capturing image features.

The generated images from the DCGAN model trained on three different datasets are shown in Fig. 7. While it is evident that the model starts to capture some fine details, it remains weak in terms of image diversity as it continues to produce similar-looking images.

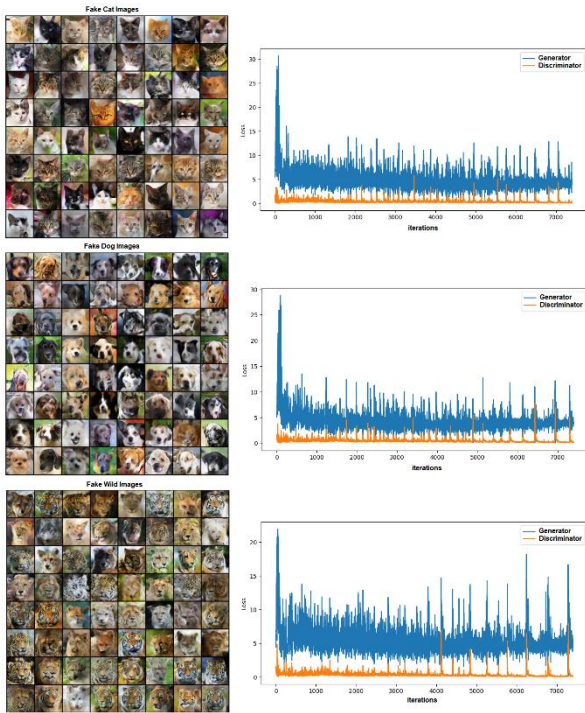


Figure 6. Images and loss plots produced in the DCGAN model trained with AFHQ Cat, AFHQ Dog and AFHQ Wild Animals datasets.

This occurs when the generative model becomes too specialized in capturing training data models but fails to generalize well to unseen data.



Figure 7. Mode collapse observed with synthetic images generated the latent space dimension $z=1$ of DCGAN trained with three separate datasets.

To determine whether some visually generating "fake" images were simply memorized training data or suffered from overfitting, we compared them with the training images. Since manual comparison was not feasible, we used a distance metric, namely the Euclidean distance network, to measure the similarity between the feature representations of the generated images and the training images. As we extracted the clearest images with the cat dataset in our experiments, the cat dataset was utilized as

a reference. We selected the closest neighbors (from the training data) for the generated images based on their feature representations. Fig. 8 illustrates the closest neighbors for three selected images per latent space dimension $\dim(z) \in 8, 100, 512, 1000$. We can observe the similarities between the generated images and their closest neighbors. However, no model produced images that were identical to the training images, indicating that the generators were able to learn meaningful and generalizable data representations without significant overfitting.



Figure 8. Nearest neighbor of three chosen generated images per each latent dimension $\dim(z) \in 8, 100, 512, 1000$.

Conclusion

The choice of noise vector size used in the latent space domain is usually made by empirical experiments to question the ultimate effect of the performance of the generative model on a given data set. This article explores the effect of the latent field dimension on DCGAN's ability to synthesize plausible and diverse animal facial images and learn a semantically interpretable latent representation of the data. Visual inspection of the synthesized images showed that increasing or decreasing the commonly preferred common latent size (100) still enables the generative model to produce new compelling animal facial images. In our experiments, despite going as high as 512 and 1000, the complex variations and details in the generated images could not be captured. However, a significant improvement in DCGAN performance has been seen in recent increments of the 4th latent dimension. Further increase in latent size (8 - 100- 512 -1000) after initial improvements resulted in less degradation of learned mapping on DCGAN performance in quantitative graphs and a milder positive impact on qualitative results. Considering both the quantitative and qualitative results, dimensions 8, 100, and 512 seem to be the most prominent in our settings. Considering the performance of the hidden area dimension 8, FID and IS values at the end of the training, sample diversity and image quality are similar to the common hidden dimension. Nevertheless, the overall performance of the model trained with a 100-dimensional hidden space field shows remarkable results. Possible mode crashes and instability in the DCGAN training procedure are related to many factors as well as to the chosen hidden dimension value. Ultimately, the latent space dimension is a factor that affects the performance of GANs. In future studies, research on automatic hidden area size selection for GANs can be investigated. These studies may attempt to automatically determine the optimal size by analyzing the characteristics of the dataset or by other methods. This can enable the user to use GANs more easily and

effectively without having to adjust the size by trial and error. As a result, this study can lead to advances in generative modeling and better understanding of the effects of hidden area size on GAN performance and designing better GAN models to optimize. Second, by combining quantitative and qualitative assessment methods, researchers can obtain a more comprehensive assessment of GAN models, taking into account both objective measures and subjective human perception. This helps assess the strengths and weaknesses of the model's performance and make informed decisions about its further development.

"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] M. Ucan, B. Kaya and M. Kaya, "Comparison of deep learning models for body cavity fluid cytology images classification." In *2022 International Conference on Data Analytics for Business and Industry (ICDABI) 2022*, pp. 151–155.
- [2] M. Atas, Y. Yardimci and A. Temizel, "Aflatoxin contaminated chili pepper detection by hyperspectral imaging and machine learning." *Sensing for Agriculture and Food Quality and Safety III*. vol. 8027. SPIE, 2011.
- [3] M. Ataş et al., "Use of interactive multisensor snow and ice mapping system snow cover maps (IMS) and artificial neural networks for simulating river discharges in Eastern Turkey." *Arabian Journal of Geosciences* 9, 2016, pp. 1-17.
- [4] H. Acar, M. S. Özerdem and E. Acar, "Soil moisture inversion via semiempirical and machine learning methods with full-polarization radarsat-2 and polarimetric target decomposition data: A comparative study." *IEEE Access*, vol. 8, pp. 197896–197907, 2020.
- [5] I. Goodfellow et al., "Generative adversarial networks," *Communications of the ACM*, vol. 63, no. 11, pp. 139–144, Nov. 2020. DOI: 10.1145/3422622.
- [6] A. Radford, L. Metz and S. Chintala, "Unsupervised representation learning with deep convolutional generative adversarial networks." *arXiv preprint arXiv:1511.06434*, 2015.
- [7] K. N. Mai, and M. Hwang, "Finding the best k for the dimension of the latent space in autoencoders," in *Computational Collective Intelligence: 12th International Conference*, 2020, pp. 453–464.
- [8] D. S. Ayvaz, and M. I. Baytas, "Investigating conversion from mild cognitive impairment to alzheimer's disease using latent space manipulation." *arXiv preprint arXiv:2111.08794* 2021.
- [9] K. Shimizu et al. "Human Latent Metrics: Perceptual and Cognitive Response Correlates to Distance in GAN Latent Space for Facial Images." *ACM Symposium on Applied Perception*, 2022, pp. 1–10.
- [10] Z. Zhang and L. Schomaker, Optimizing and interpreting the latent space of the conditional text-to-image GANs. *Neural Comput & Applic*, Springer 2023, vol. 36, pp. 2549–2572. <https://doi.org/10.1007/s00521-023-09185-6>.
- [11] E. Ntavelis et al. "StyleGenes: Discrete and efficient latent distributions for GANs." *Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision*. 2024, pp. 4077 – 4086.
- [12] AFHQ, Animal faces, 2020. [Online]. Available: <https://www.kaggle.com/datasets/undrewmvd/animal-faces>.
- [13] N. Nekamiche et al., "A deep convolution generative adversarial network for the production of images of human faces," in *Intelligent Information and Database Systems: 14th Asian 19 Conference, ACIIDS*, 2022, pp. 313–326.
- [14] K. Cheng et al., "An analysis of generative adversarial networks and variants for image synthesis on MNIST dataset," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 79, no. 19, pp. 13725–13752, Feb. 2020. DOI: 10.1007/s11042-019-08600-2.
- [15] T. Salimans et al., "Improved techniques for training GANs," *NIPS'16: Proceedings of the 30th International Conference on Neural Information Processing Systems*, 2016, pp. 2234–2242.
- [16] M. Heusel et al., "GANs trained by a two time-scale update rule converge to a local Nash equilibrium," *NIPS'17: Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems*, 2017, pp. 6629–6640.
- [17] C. Szegedy et al., "Rethinking the inception architecture for computer vision," in *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2016, pp. 2818–2826.
- [18] J. Deng et al., "Imagenet: A large-scale hierarchical image database," in *2009 IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2009, pp. 248–255.
- [19] S. Barratt and R. Sharma, "A note on the inception score," *arXiv preprint arXiv:1801.01973*, 2018.
- [20] O. Kramer, "Dimensionality reduction with unsupervised nearest neighbors," Berlin, Springer, 2013, vol. 51, pp. 13-23.

- [21] M. Ataş, "Open Cezeri Library: A novel java based matrix and computer vision framework." *Computer Applications in Engineering Education*, pp. 736-743, 2016.
- [22] D. P. Kingma and J. Ba, "Adam: A method for stochastic optimization," *arXiv preprint arXiv:1412.6980*, 2014.
- [23] I. Marin, S. Gotovac and M. Russo, "Evaluation of generative adversarial network for human face image synthesis," in *International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, IEEE, 2020, pp. 1–6.
- [24] I. Marin et al., "The effect of latent space dimension on the quality of synthesized human face images," *Journal of Communications Software and Systems*, vol. 17, no. 2, pp. 124–133, May 2021. DOI: 10.24138/jcomss-2021-0035.



Edge Boosted Global Awarred Low-light Image Enhancement Network

Büşra SÖYLEMEZ^{1*}, Serdar ÇİFTÇİ²

¹ Harran University, Department of Computer Engineering, busrasoylemez@harran.edu.tr, Orcid No: 0009-0009-1690-3136

² Harran University, Department of Computer Engineering, serdarciftci@harran.edu.tr, Orcid No: 0000-0001-7074-2876

ARTICLE INFO

Article history:

Received 23 November 2023
Received in revised form 10 February 2024
Accepted 20 March 2024
Available online 29 March 2024

Keywords:

Low-light image enhancement, U-net based edge extraction, Channel attention, Color preservation, Improved GLADNet, Canny

ABSTRACT

Low-light images are captured in situations where the environment lighting is poor or the camera hardware is not capable of producing good quality images. These types of images tend to have low contrast, blurry details, noise, and color distortion. In computer vision applications, image brightness plays a crucial role, and therefore, low-light image enhancement is used as a preprocessing step. In this study, we have improved the Low-Light Enhancement Network with Global Awareness (GLADNet) method by adding a U-Net based edge information extraction unit. The channel attention mechanism was also incorporated into the edge information extraction unit to achieve color preservation. Our experiments show that our proposed method has achieved higher PSNR, SSIM, and FSIM metrics compared to reference images. Additionally, it has produced lower NIQE and BRISQUE values for non-reference performance evaluation. Moreover, our proposed method removes noise better and produces visual results that are closer to the target images.

Doi: 10.24012/dumf.1395168

* Corresponding author

Introduction

Low-light images can result from poor camera settings or from camera sensors that are not exposed to enough light. It is important to have good image quality both for human visual pleasing and for the performance of computer vision algorithms. A number of studies [1]-[4] have been conducted in the field of low-light image enhancement, which includes techniques such as illuminating insufficient brightness, preventing color distortion, removing noise, and preserving texture and detail. Previous work in this area has been based on various methods such as histogram equalization [5]-[9], gamma correction [10]-[12], Retinex theory [13]-[16], and deep learning [17]-[19], among others.

Histogram equalization is a method used to enhance the contrast of an image by adjusting the distribution of its gray levels [20]. This technique works by spreading the distribution of gray levels over a wider range, which makes unclear details in the image more clear. However, applying this method to the entire image can lead to undesirable outcomes, such as bright regions reaching saturation values. To overcome this problem, an adaptive histogram equalization (AHE) [5] technique is used, which computes local histograms from different regions of the image and performs histogram equalization with respect to these regions. However,

AHE can be slow and produce noise in homogeneous regions. To avoid oversaturation and noise, the Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) [6] technique applies a threshold to each local histogram equalization. Another extension of histogram equalization, the Brightness Preserving Dynamic Histogram Equalization (BPDHE) [7], aims to improve contrast while preserving the average brightness of the image.

The enhancement of low-light images by gamma correction is inspired by the interaction between humans and nature. The sensitivity of the human eye to brightness is thought to be exponentially proportional to the amount of light entering from the outside [21]. In dimly lit environments, the human eye is more sensitive to differences in brightness, but as the amount of light increases, the eye's ability to detect differences in brightness decreases. To avoid this, the image is exponentiated with the gamma value. Because gamma correction is applied to the entire image, it can create unwanted saturation or dark areas depending on the exponentiation value. To avoid these situations, adaptive gamma correction (AGC) [10] has been proposed. This method uses statistical information about the images to determine the parameters needed to improve contrast.

Retinex theory is an approach that assumes that an image can be decomposed into two components: illumination and reflection [22]. The idea of Retinex theory led to the development of the Single Scale Retinex (SSR) algorithm [13], which uses a single Gaussian filter to estimate the illumination map of the image after decomposing it. However, SSR may not be able to capture all the details in dark images while estimating the illumination map. To address this, researchers have developed the Multiscale Retinex (MSR) architecture [14], which applies Gaussian filters at different scales to the image and combines the filtered results. However, this can cause color distortion and halo effects in the image. To improve this situation, the Multiscale Retinex with Color Restoration (MSRCR) approach [15] approach adds a color factor that processes the R, G, and B channels of the image to restore its color and prevent halos and color distortion.

Deep learning is a type of neural network that consists of multiple layers and different architectures [23]. Research in low-light image enhancement has benefited greatly from the development of deep learning. One of the first deep learning models for low-light image enhancement is the Low-light Net (LLNet) [17]. LLNet uses deep autoencoders, known as Stacked Sparse Denoising Autoencoders (SSDA), to learn the basic characteristics of low-light images and enhance image contrast while reducing noise. Another study, the Multi-Branch Low-Light Enhancement Network (MBLLEN) [18], developed a branched model consisting of three subnetworks designed to extract features at different levels. The Feature Extraction Network (FEM) is the first subnetwork that extracts features at different levels. The Enhancement Module (EM) is the second subnetwork that enhances the extracted features, and the third subnetwork, the Fusion Module (FM), performs multi-branch fusion.

Edge detection is used to detect significant changes in brightness within an image [24]. The information about edges in an image is one of the important features and therefore a topic of research [25]. The importance of edge detection can be observed in its use in various studies such as image segmentation [26] and image recognition [27]. In this study, we aimed to improve the quality of images by enhancing the detail information, which would reduce the loss of content due to lack of detail in low-light images. To achieve this, we conducted experiments by adding edge information to the detail reconstruction block in the GLAD-Net [28] architecture.

The main contributions of our study can be summarized as follows:

- Adding edge information increases the detail of the image, resulting in better visual and numerical results.
- Adding a channel attention mechanism to the edge extraction block preserves the color information.
- The proposed method reduces noise and improves en-

hancement on images with higher edge complexity.

Related Work

Low-light images are characterized by low contrast, blur, and high ISO noise [29]. These types of images are often difficult to recognize, and various methods have been developed to improve contrast and brightness while removing noise. One of the earlier approaches was based on histogram equalization. Dynamic Histogram Equalization (DHE) [30] divides the histogram of the input image according to local minima and applies histogram equalization to each image segment. This provides both local and global contrast enhancement in the image, and the result of histogram equalization is with good detail preservation. However, DHE does not preserve the average brightness of the image, which can lead to saturation. To overcome this shortcoming, a method called Brightness Preserving Dynamic Histogram Equalization (BPDHE) [7] was proposed. First, a Gaussian filter is applied to the image histogram. Then, the image is divided into local maxima. This approach preserves the average brightness of the image better. Histogram equalization is applied to each subdivision, and finally, the output image is normalized with respect to the input image to compensate for the effects of the operations on the average brightness. This preserves the average brightness of the image, and results in a contrast-enhanced image. The Contextual and Variational Contrast (CVC) algorithm has been developed by Celik and Tjahjadi [31]. This algorithm uses a histogram-based approach to enhance the contrast of an input image. It creates a 2D histogram of the input image by using the relationship between each pixel and its neighbors. The CVC algorithm works effectively on both gray and color images. It preserves the detail information of the input image while enhancing the contrast of images taken under different lighting conditions. However, it does not fully exploit the relationship between input and output gray level differences. To solve this problem, Lee et al [32] proposed a new contrast enhancement method that uses LDR to control the output gray level differences. They extract 2D histograms with a different approach than CVC. They exploit the statistical information of gray level differences between neighboring pixels of the input image, and use optimization for enhancement at each layer.

Guo et al. proposed the Retinex-based LIME method [33] for low-light image enhancement. This method focuses only on estimating the illumination factor of an image. It estimates an illumination map using the maximum values in the R, G, and B color channels of an image. They propose an algorithm based on the Lagrangian Multiplier (ALM) to enhance this estimated illumination map. Although it has a good performance on image enhancement in low light conditions, the enhanced image has a noise problem. To reduce the noise in the image, Ren et al. proposed Robust Low-Light Enhancement via Low-Rank Regularized Retinex Model (LR3M) [34], which estimates the illumination and reflectance map in the image in a sequential manner. This ranking is done to remove noise from the reflectance map according to the low-rank priority. Xu et al. developed a method that also considers the color of the image, the structure and texture aware retinex model (STAR) [35] generates

structure and texture maps using the exponentiated mean local variance (EMLV) filter. This allows for more accurate estimation of reflectance and illumination components. The unsupervised low-light image enhancement network ZERRIN-Net [36], which focuses on low-light noise removal, consists of the noise estimation subnetwork N-net, the reflection component estimation subnetwork RI-Net. The network DMT-Net [37] consists of several networks: Decoupled-Net to separate the luminance channel into reflectance and illumination, Denoising-Net to remove noise in reflectance, Boosting-Net to improve illumination and reduce halo effects, and Chrominance-Net to reduce chromatic distortion of Cb and Cr channels. The Self-Reference Deep Adaptive Curve Estimation (Self-DACE) network [38] is a two-part architecture consisting of an adaptive curve to improve the brightness of low-light images and a noise removal method to estimate and remove hidden noise in images. Real-low to Real-normal Network (R2RNet) [39] is a Retinex-based network consisting of Decom-Net to decompose the input image into illumination and reflectance components, Denoise-Net to remove noise from the reflectance map and Relight-Net to improve contrast.

The Edge-Enhanced Multi-Exposure Fusion Network (EEMEFN) [40], designed to reduce image noise, correct color distortion, and enhance edge information lost at low illumination levels, consists of two basic networks. It includes a Multi-Exposure Fusion (MEF) module specifically designed to deal with high contrast and color distortion, and an Edge Enhancement (EE) module to enhance and sharpen edge information. This proposed dual network structure aims to provide effective image processing solutions to achieve cleaner and higher quality image results. Zero-Reference Deep Curve Estimation [19], a deep learning-based method, has been developed to enhance low-light images. It finds a Deep Curve Estimation Network (DCE-Net) that estimates an image-specific curve. The estimated curves are used to create an enhanced image by adjusting the dynamic range of the input image on a pixel-by-pixel basis. Fu et al [41] propose Low-light Enhancement Generative Adversarial Network (LE-GAN), an unsupervised method based on Generative Adversarial Network (GAN), which aims to enhance image brightness, remove image noise, and improve color distortion using attention mechanisms. Convolutional Dense Attention Guided Network (CDAN) [42] aims to improve the performance of the architecture by adding convolutional blocks, dense blocks, attention modules, and jump links to autoencoders that aim to enhance low-brightness images while preserving natural colors. Fast and Light-Weight Network (FLW-Net) [43] consists of two relative loss functions with Global Feature Extraction (GFE) and Local Enhancement Network (LEN) subnetworks to remove network noise and preserve structural information.

Edge detection is the process of identifying the boundaries or edges of objects in an image. In image processing, edge detection is a critical preprocessing step because edges provide valuable information for determining the shape, size, and position of objects. Edge detection plays an important role in several computer vision applications, includ-

ing image segmentation, object recognition, medical imaging, and visual saliency generation [44]. The Canny edge detection algorithm [45] is an efficient method that has been widely used to detect edges in images. Various methods are used to extract edge information, such as Roberts [46], Prewitt [47], and Sobel [48]. These methods are used in object recognition and other image processing tasks to emphasize structure in images and to highlight edge information.

With the rapid advancements in deep learning, many new deep learning networks have emerged to solve problems in computer vision. One such architecture is U-Net, which has gained prominence due to its unique design that caters to medical image segmentation. The U-Net architecture is characterized by its U-shaped structure and the inclusion of contextual information, which makes it fast and efficient [49]. It is designed to work with limited data usage, which is a significant advantage. The architecture comprises network convolution and inverse convolution layers arranged symmetrically. Each convolution layer is followed by a ReLU activation function and a maximum pooling process. The inward shrinking structure inside this symmetric structure creates a bottleneck that contains all the essential features of the image. This particular design ensures that efficient results can be achieved even with less data [50].

There are several studies that use the U-Net architecture for low-light image enhancement. One of these studies, the Kindling the Darkness (KinD) network [51], aims to both remove noise and accurately enhance the color information of the image while illuminating an image taken under low light levels. It performs the training process with three networks: a decomposition network, a reflectance restoration network, and an illumination adjustment network. The reflectance restoration network, based on the U-Net, consists of 10 convolutional layers. Each double convolution is followed by maximum pooling. Another study by Jiang et al. [52] developed a self-regulated low-light image enhancement architecture that aims to prevent image chromatic aberration. This architecture includes a reflectance estimation network. This network is based on the U-Net. It consists of 19 convolutional layers, four subsampling steps, and four upsampling layers. This work includes several network models that focus on low-light image enhancement using the U-Net architecture and achieve impressive results.

The LAU-Net [53] is an advanced network that is integrated with the U-Net and consists of three main components: the Parallel Attention Unit (PAU), the Internal Resizing Module (IRM), and external convolutional layers. The PAU uses attention mechanisms at the end of the encoder blocks to extract important features from both spatial and channel dimensions. The IRM facilitates the flow of information by creating long jump connections within the network, while the external convolutional layers help reduce noise in the input image. On the other hand, the AFDNet [54] is based on the U-Net architecture and has an Adaptive Frequency Decomposition (AFD) module that adaptively extracts low frequency information for contrast enhancement and noise reduction, and low and high frequency information for detail recovery. The Laplacian pyramid in the

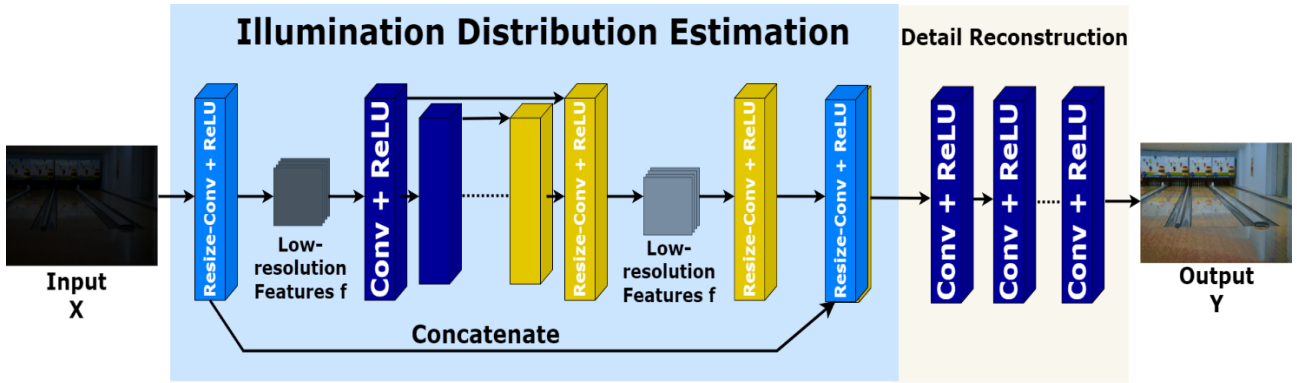


Figure 1. GLADNet architecture [28].

network increases the width of the feature, which strengthens the connection between the encoder and decoder and guides the recovery of image details.

Proposed Method

The GLADNet [28] architecture is an image enhancement method that first uses a global illumination distribution estimation network and attempts to estimate the illumination map of the image. It then combines this estimated map with the input image. This combined image is the input image to the detail reconstruction network. The network is designed to extract the details from the dark image content. The architecture of GLADNet is shown in Figure 1. The edge information of the components in an image is the detail information of the image. It is a very difficult task to extract the edge information of objects in a dark image while illuminating it. While the GLADNet architecture illuminates the content of an image, we propose an additional integrated network to further sharpen the fine details in the texture of the image and the edge information it contains. This specialized network, shown in Figure 2, learns the edge infor-

low-light image enhancement. The model adapted from GLADNet is shown in Figure 3.

The architecture of GLADNet [28] consists of two main parts. The first part, Global Illumination Distribution Estimation, contains the network that performs the illumination estimation of the image. The second part, Detail Reconstruction, is used to recover detail information. First, the input image is resized to 96x96 using nearest neighbor interpolation. This is followed by a ReLU activation function and a downsampling layer. The image is then passed through a network of encoders and decoders. This network consists of 5 downsampling and 5 upsampling networks. Each convolution layer has two steps with a kernel size of 3x3. The ReLU activation function is used in each layer. The resizing size and receptive area of each layer are adjusted to ensure full coverage of the bottleneck layer.

Each downsampling layer is connected to the corresponding upsampling layers by jump links. During the reconstruction phase, the focus is on recovering details. The details may be lost during the illumination estimation of the

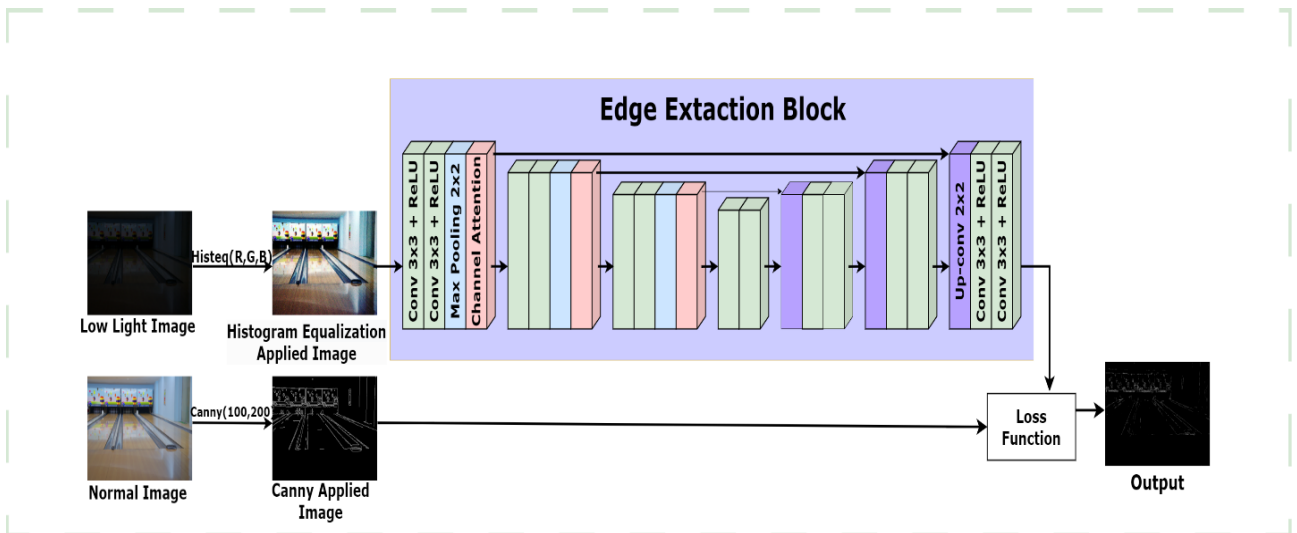


Figure 2. The proposed Edge Extraction Block.

mation within the image itself. The results of this network are fed into the detail reconstruction network and combined with the results of the GLADNet network. This integration increases the strength of GLADNet and its effectiveness in

reconstructed image. Therefore, the original image is considered to have more detail information than the generated prediction result. Both the estimated image result and the

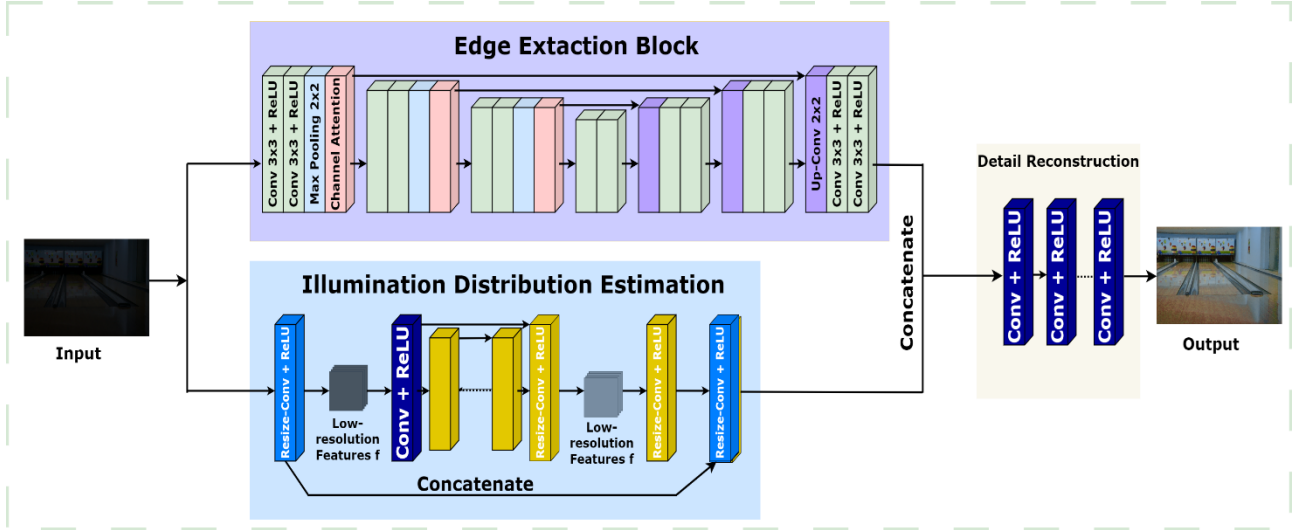


Figure 3. The proposed approach modified from GLADNet [28].

original image are merged. Then, three successive convolution layers are applied to the merged image. In the proposed method, we applied 5 convolutional layers. In these layers, the ReLU activation function and the number of steps are set to 2, and the L1 norm is used as the loss function.

Our Approach

The proposed method is designed to increase the detail information in the reconstruction phase by focusing on the edge information of objects in the image. The proposed Edge Extraction Block (EEB) is shown in Figure 2. The EEB unit consists of encoders and decoders, gets a histogram equalized low light image as input, and the decoder side compares the results with the Canny [45] edge information of the ground truth image. This network consists of 8 convolution layers to focus on learning the object edge information of the low-resolution image. Each pair of convolution layers is connected to the corresponding upsampling layers by skip connections. In addition, after the first three double convolution layers, the channel attention module (CA), one of the attention mechanisms used in the work of Zamir et al. [55], is employed. The CA mechanism generates more salient edge information by making the network focus on more important channels.

The edge information obtained as a result of the encoder and decoder was used as input for the reconstruction stage by combining the detailed original image with the predicted edges. The Binary Cross Entropy Loss function was used for this network. The proposed approach ensured the preservation of details.

Experiments

The proposed model is trained using two different datasets, low-light matched (LOL) dataset [60] and RAISE [61]. The LOL dataset consists of 500 images with 585 for training and 15 for testing. The RAISE dataset is a synthetic dataset of 1000 image pairs, and the exposure value is adjusted using the Adobe Lightroom photo editing program by modifying Highlights, Shadows, Vibrance, Whites.

These settings are adjusted so that the histogram of the Y channel of the image matches the result.

In this study, to assess the effectiveness of the proposed approach, we utilized five metrics. Three of these metrics used reference images: Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR), Structural Similarity Index (SSIM), and Feature Similarity Index (FSIM). The remaining two metrics were used for non-reference images, namely Natural Image Quality Evaluator (NIQE) and Blind/Referenceless Image Spatial Quality Evaluator (BRISQUE).

PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) [56] is a commonly used metric for assessing the quality of an image. This metric measures the similarity between the original image and the reconstructed or compressed image in terms of pixel values. It evaluates how well the reconstructed image preserves the details and characteristics of the original image.

$$\text{PSNR} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\text{MAX}^2}{\text{MSE}} \right) \quad (1)$$

Where MAX is the maximum signal level and MSE is the mean squared error. A mean squared error (MSE) is the average square of the difference between the processed image and the reference image. It is computed by the following formula.

$$\text{MSE} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (f_{ij} - g_{ij})^2 \quad (2)$$

Here, i and j are the pixel positions of image M multiplied by image N .

The SSIM (Structural Similarity Index) [56] is a metric that measures structural similarity by taking subsections from an image to compare the similarity between two images. This metric evaluates the similarity between images by considering factors such as color and contrast. It is computed by the following formula.

$$\text{SSIM}(f, g) = [l(f, g)]^\alpha \cdot [c(f, g)]^\beta \cdot [s(f, g)]^\gamma \quad (3)$$

Here, f and g represent the input and target images, respectively. $l(f, g)$, $c(f, g)$ and $s(f, g)$ respectively represent the



Figure 4. Visual results. The abbreviations of EEB, CA, and GT namely stands for Edge Extraction Block, Channel Attention, and Ground Truth.

illumination of the image, the contrast of the image and the structural difference of the image, and α , β , λ are positive constants. Each component is calculated by the formulas given below.

$$l(f, g) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1} \quad (4)$$

$$c(f, g) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2} \quad (5)$$

$$s(f, g) = \frac{2\sigma_{xy}\sigma_y + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3} \quad (6)$$

Here, $\mu_x\mu_y$ is the average brightness of the target image with the input image. $\sigma_x\sigma_y$ is the standard deviation of the brightness between the input image and the target image. σ_{xy} is the covariance between the input image and the target image, and C_1 , C_2 , C_3 are constants.

The Feature Similarity Index Matrix (FSIM) [57] takes out two attributes, Phase Congruency (PC) and Gradient Magnitude (GM), to evaluate the image quality, and makes an evaluation according to these properties. The formula is given below.

$$S_L(x) = [S_{PC}(x)]^\alpha \cdot [S_G(x)]^\beta \quad (7)$$

Where PC is the phase compatibility and GM is the gradient magnitude. The α and β parameters determine the relative importance of the PC and GM properties. The PC and GM formulations are given below.

$$GM(x) = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (8)$$

Here G_x refers to the horizontal gradient of the image, G_y to the vertical gradient of the image.

$$S_{PC} = \frac{2PC_1PC_2 + T_1}{PC_1^2 + PC_2^2 + T_1} \quad (9)$$

Here, T_1 is a positive constant that increases the stability of the S_{PC} . The S_{PC} range is from 0 to 1.

The Natural Image Quality Evaluator (NIQE) [58] is used as a completely blind, non-reference evaluation measure for properties derived from the statistical properties of undistorted natural images. The Blind/Referenceless Image Spatial Quality Evaluator (BRISQUE) [59] is a blind, non-reference image quality evaluation metric based on natural scene statistics. BRISQUE is an index that measures the quality of an image close to the image quality perceived by the human eye. This index uses a feature-based approach to assess image quality and can operate without the need for a reference image.

Table 1. The quantitative experiments.

Base	EEB	CA	PSNR (\uparrow)	SSIM (\uparrow)	FSIM (\uparrow)
✓			16.5925	0.6503	0.8184
✓	✓		16.7298	0.6619	0.8190
✓	✓	✓	16.9710	0.6629	0.8267

Table 1 shows that the results with the Edge Extraction Block added to the proposed architecture perform well when compared to the GLADNet results. With the addition of the Channel Attention (CA) block to the proposed Edge Extraction block, it is found that the color matching in the image is further improved. In Figure 4, a low-light image was given to different architectures and specific regions were cropped to show the visual results. When the cropped images were examined, it was found that the visual result produced by the inspired architecture was not very similar to the target image. However, when an edge extraction block was added to the architecture, the detail in the cropped image increased. By further adding channel attention to the proposed edge extraction block, the produced image color became even closer to the target image.

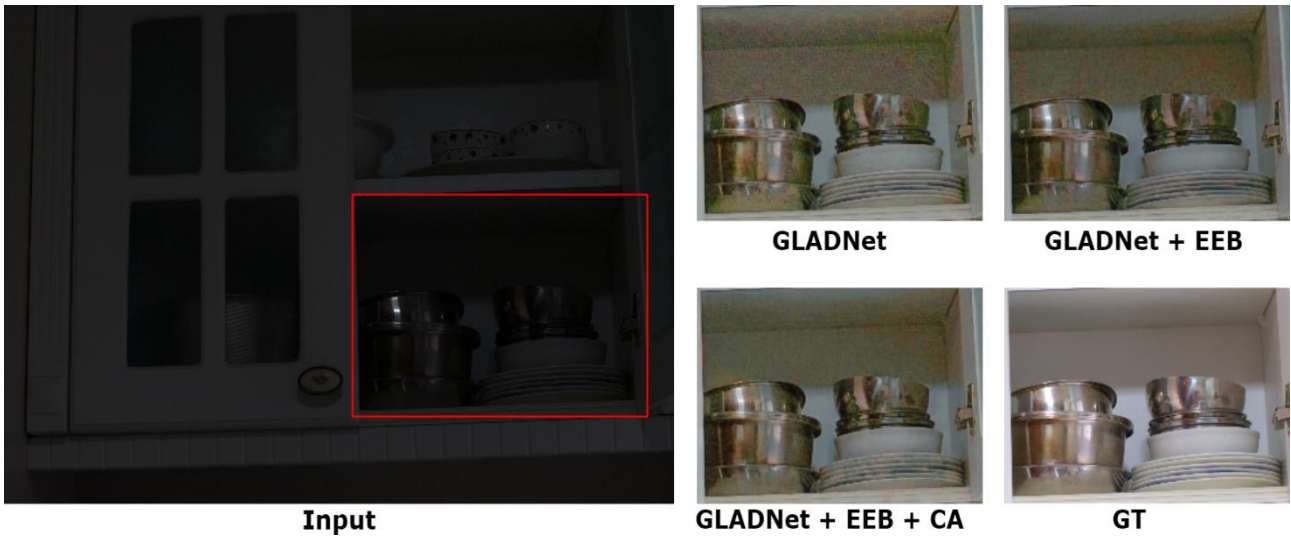


Figure 5. Visual results. The abbreviations of EEB, CA, and GT namely stands for Edge Extraction Block, Channel Attention, and Ground Truth.

In Figure 5, the base model shows noise, while the proposed architecture with edge extraction block shows less noise. By adding channel attention, even better noise removal is achieved.

We compared our proposed method with state-of-the-art methods on the LOL dataset and presented the results in Table 2. Our method outperformed the compared methods.

Two test images were used to measure the effectiveness of a proposed model. The aim was to determine whether the proposed model performed better on complex or flat images. This was done by calculating the number of edge pixels in both images. The image with the higher number of edge pixels was considered complex, while the image with a lower sum of edge pixels was considered flat. To calculate the edge pixels, the Canny algorithm was applied to both images. The normal bright image, represented by

"a" in Figure 6, had 16.228 edge pixels. The image containing "c" had 10.424 edge pixels. When the proposed models were tested using the PSNR metric, the GLADNet architecture produced a result of 18.8204 on the complex image. The proposed edge block resulted in a score of 21.1139, and when the channel attention mechanism was added to the edge blocks, the result was 21.2802. This represents a 13.1% increase in performance for the proposed architecture.

Table 2. The performance comparison of the proposed method with state-of-the-art methods.

Method/Metric	PSNR (↑)	SSIM (↑)
Histogram Equalization	14.5414	0.4664
RetinexNET [60]	14.9281	0.4896
SSINet [62]	15.4248	0.6562
Kind [51]	16.1909	0.7090
Ours	16.9710	0.6629

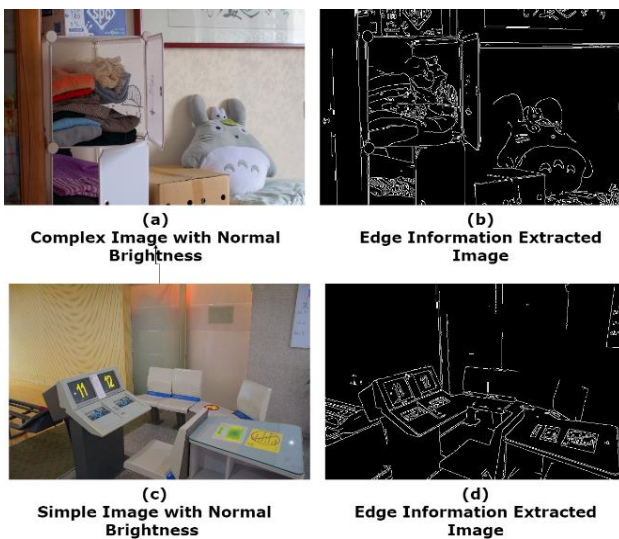


Figure 6. Complexity of images based on edge information.

Two photos were taken in the evening, when it was getting dark, and in a room with artificial light. The proposed architectures were successively applied to these photographs. The images were compared numerically with the NIQE and BRISQUE metrics since they did not correspond to the reference image with normal lighting. Looking at the numerical results of the images taken in Figure (7) Indoor and Figure (8) Outdoor in Table (3), the BRISQUE value is good when the EEB is added to the proposed interior architecture. Both the NIQE and BRISQUE values were better when the proposed architecture was added to EEB with CA, while in the outdoor environment, the value was better when EEB and CA were added. When the visual results are

examined, we can see that the color and edge information are preserved both in the indoor and outdoor environments.

Table 3. Numerical comparison of indoor and outdoor images captured from real-world environments.

	Method/ Metric	NIQE (\downarrow)	BRISQUE (\downarrow)
Outdoor Scenes	GLADNet	3.9537	25.9353
	GLADNet+ EEB	4.1320	19.2600
	GLADNet+ EEB + CA	3.8555	22.8995
Indoor Scenes	GLADNet	6.4291	33.4529
	GLADNet + EEB	5.5562	39.7556
	GLADNet + EEB + CA	5.3216	32.5379



Figure 7. Effects of the proposed method on real-world indoor scenes.

Running Time Comparison

In order to determine the running time of the proposed method, we ran each model ten times and calculated the average running time. The average running times for both the based and the proposed models are presented in Table 4. It is worth noting that the inclusion of EEB and channel attention resulted in a slight increase in the running time.

Table 4. The comparison of running times.

Method	Average Working Time
GLADNet	0.1552
GLADNet + EEB	0.1570
GLADNet + EEB + CA	0.1574

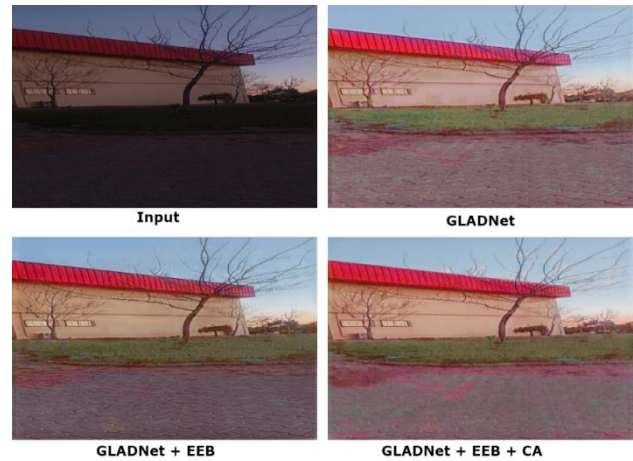


Figure 8. Effects of the proposed method on real-world outdoor scenes.

Configurations

We used the same Adam optimization method as in the original study. As set up, each mini-group contains 8 image pairs. It starts training with a learning rate of $1e-3$ and is adjusted every 100 mini-group passes by multiplying this rate by 0.96. The model was trained for exactly 50 epochs. For the edge information extraction network, we used the Adam optimization method. This network was trained for 250 epochs. We used TÜBİTAK TRUBA infrastructure to train the proposed method.

Conclusion

Edge information improves the image. It organizes the image away from blurring, extracts the edge information of objects in the image, and increases the saliency of objects in the image. In this regard, it has been the subject of interest in many studies. In this study, we have developed a network that captures the edge information of the image, which we believe will be effective in increasing the image detail. This improves the original model and makes it easier to increase the detail information of the image while brightening it. Due to inadequate camera equipment and environmental conditions, images may have been taken in low-light conditions. Inadequate lighting can have the effect of obscuring some areas of the image content or the entire image. In this study, an edge information extraction network is added to an architecture that has been developed for image enhancement in low light conditions. The goal of this network is to capture the fine texture and sharp edge information of objects in the image in detail while the image is illuminated. Since we have a limited image dataset to train this network, we used the U-Net architecture, which gives good results on small datasets. Histogram equalization was applied to the low-light image to reveal the details in the image. The edge information of the target image was detected using the Canny detector. In the U-Net architecture, the edge information of the low-light image with histogram equalization is learned by targeting the edge information of the target image. This network, called the edge information extraction

network, aims to illuminate the image by preserving more detailed information. The detail reconstruction network of the GLADNet architecture is combined with the result of the edge information extraction network. This result is added to the reconstruction detail information recovery network. The experiments show that we achieved high PNSR, SSIM, and FSIM metrics, and the results are close in color to the target images. Similarly, lower results were obtained for NIQE and BRISQUE values in the non-reference metric measurements. The complexity test we applied and there is less runtime difference by adding the EEB block. Conducted experiments also showed that the added edge information improves more on complex images. When we model the low-light image from everyday life, we see a visual and numerical improvement. As a future work we plan to use attention mechanisms to improve illumination of the low-light images.

Acknowledgement

The numerical calculations reported in this paper were fully/partially performed at TUBITAK ULAKBIM, High Performance and Grid Computing Center (TRUBA resources).

References

- [1] C. Li et al., "Low-Light Image and Video Enhancement Using Deep Learning: A Survey," in *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 44, no. 12, pp. 9396- 9416, 1 Dec. 2022, doi: 10.1109/TPAMI.2021.3126387.
- [2] W. Wang, X. Wu, X. Yuan and Z. Gao, "An Experiment-Based Review of Low-Light Image Enhancement Methods," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 87884-87917, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2992749.
- [3] N. P. Galatsanos, C. A. Segall and A. K. Katsaggelos, "Digital image enhancement", *Encyclopedia of Optical Engineering*, pp. 388- 402, 2003.
- [4] X. Liu, M. Pedersen and R. Wang, "Survey of natural image enhancement techniques: Classification evaluation challenges and perspectives", *Digital Signal Processing*, pp. 103547, 2022.
- [5] S. M. Pizer et al., "Adaptive histogram equalization and its variations", *Comput. Vis. Graph. Image Process.*, vol. 39, no. 3, pp. 355-368, 1987.
- [6] K. Zuiderveld, "Contrast limited adaptive histogram equalization", *Proc. Graph. Gems*, pp. 474-485, 1994.
- [7] H. Ibrahim and N. S. Pik Kong, "Brightness Preserving Dynamic Histogram Equalization for Image Contrast Enhancement," in *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 53, no. 4, pp. 1752-1758, Nov. 2007, doi: 10.1109/TCE.2007.4429280.
- [8] K. Nakai, Y. Hoshi and A. Taguchi, "Color image contrast enhancement method based on differential intensity/saturation gray-levels histograms," 2013 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems, Naha, Japan, 2013, pp. 445-449, doi: 10.1109/ISPACS.2013.6704591.
- [9] Yu Wang, Qian Chen and Baeomin Zhang, "Image enhancement based on equal area dualistic subimage histogram equalization method," in *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 45, no. 1, pp. 68-75, Feb. 1999, doi: 10.1109/30.754419.
- [10] S. Rahman, M. M. Rahman, M. Abdullah-AIWadud, G. D. Al-Quaderi and M. Shoyaib, "An adaptive gamma correction for image enhancement", *EURASIP J. Image Video Process.*, vol. 2016, no. 1, pp. 1-13, Dec. 2016.
- [11] Z.-G. Wang, Z.-H. Liang and C.-L. Liu, "A realtime image processor with combining dynamic contrast ratio enhancement and inverse gamma correction for PDP", *Displays*, vol. 30, no. 3, pp. 133-139, Jul. 2009.
- [12] S. -C. Huang, F. -C. Cheng and Y. -S. Chiu, "Efficient Contrast Enhancement Using Adaptive Gamma Correction with Weighting Distribution," in *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 22, no. 3, pp. 1032-1041, March 2013, doi: 10.1109/TIP.2012.2226047.
- [13] D. J. Jobson, Z. Rahman and G. A. Woodell, "Properties and performance of a center/surround retinex," in *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 6, no. 3, pp. 451-462, March 1997, doi: 10.1109/83.557356.
- [14] Z. Rahman, D. J. Jobson and G. A. Woodell, "Multi-scale retinex for color image enhancement", *Proc. 3rd IEEE Int. Conf. Image Process.*, pp. 1003-1006, Sep. 1996.
- [15] D. J. Jobson, Z. Rahman and G. A. Woodell, "A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes," in *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 6, no. 7, pp. 965-976, July 1997, doi: 10.1109/83.597272.
- [16] S. Wang, J. Zheng, H. -M. Hu and B. Li, "Naturalness Preserved Enhancement Algorithm for Non-Uniform Illumination Images," in *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 22, no. 9, pp. 3538-3548, Sept. 2013, doi: 10.1109/TIP.2013.2261309.
- [17] K. G. Lore, A. Akintayo and S. Sarkar, "LLNet: A deep autoencoder approach to natural low-light image enhancement", *Pattern Recognit.*, vol. 61, pp. 650-662, Jan. 2017.
- [18] F. Lv, F. Lu and J. Wu, "MBLLEN: Low-light image/video enhancement using CNNs", *Proc. Brit. Mach. Vis. Conf.*, pp. 1-13, 2018.
- [19] C. Guo et al., "Zero-Reference Deep Curve Estimation for Low-Light Image Enhancement," 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Seattle, WA, USA, 2020, pp. 1777-1786, doi: 10.1109/CVPR42600.2020.00185.
- [20] Soong-Der Chen and A. R. Ramli, "Contrast enhancement using recursive mean-separate histogram equalization for scalable brightness preservation," in *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 49, no. 4, pp. 1301-1309, Nov. 2003, doi: 10.1109/TCE.2003.1261233.

- [21] Y. Xiao, A. Jiang, J. Ye and M. -W. Wang, "Making of Night Vision: Object Detection Under Low-Illumination," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 123075-123086, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3007610.
- [22] E. Land, "Lightness and retinex theory", *J. Opt. Soc. Amer.*, vol. 58, pp. 1428A, 1967.
- [23] S. Dong, P. Wang and K. Abbas, "A survey on deep learning and its applications", *Comput. Sci. Rev.*, 2021.
- [24] P. -M. -L. Nguyen, J. -H. Cho and S. B. Cho, "An architecture for real-time hardware co-simulation of edge detection in image processing using Prewitt edge operator," 2014 International Conference on Electronics, Information and Communications (ICEIC), Kota Kinabalu, Malaysia, 2014, pp. 1-2, doi: 10.1109/ELINFOCOM.2014.6914387.
- [25] W. Gao, X. Zhang, L. Yang, and H. Liu, "An improved Sobel edge detection," In *International Conference on Computer Science and Information Technology*, vol. 5, pp. 67– 71, IEEE, 2010, doi: 10.1109/ICCSIT.2010.5563693.
- [26] K. Zhang, L. Zhang, K. -M. Lam and D. Zhang, "A Level Set Approach to Image Segmentation With Intensity Inhomogeneity," in *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 46, no. 2, pp. 546-557, Feb. 2016, doi: 10.1109/TCYB.2015.2409119.
- [27] Ming-Hsuan Yang, D. J. Kriegman and N. Ahuja, "Detecting faces in images: a survey," in *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 24, no. 1, pp. 34-58, Jan. 2002, doi: 10.1109/34.982883.
- [28] W. Wang, C. Wei, W. Yang and J. Liu, "GLADNet: Low-light enhancement network with global awareness", *Proc. 13th IEEE Int. Conf. Autom. Face Gesture Recognit.*, pp. 751-755, May 2018.
- [29] Y. Jiang et al., "EnlightenGAN: Deep Light Enhancement Without Paired Supervision," in *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 30, pp. 2340-2349, 2021, doi: 10.1109/TIP.2021.3051462.
- [30] M. Abdullah-Al-Wadud, M. H. Kabir, M. A. A. Dewan and O. Chae, "A dynamic histogram equalization for image contrast enhancement", *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 53, no. 2, pp. 593-600, May 2007.
- [31] T. Celik and T. Tjahjadi, "Contextual and Variational Contrast Enhancement," in *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 20, no. 12, pp. 3431-3441, Dec. 2011, doi: 10.1109/TIP.2011.2157513.
- [32] C. Lee, C. Lee and C. -S. Kim, "Contrast Enhancement Based on Layered Difference Representation of 2D Histograms," in *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 22, no. 12, pp. 5372-5384, Dec. 2013, doi: 10.1109/TIP.2013.2284059.
- [33] X. Guo, Y. Li and H. Ling, "LIME: Low-Light Image Enhancement via Illumination Map Estimation," in *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 26, no. 2, pp. 982-993, Feb. 2017, doi: 10.1109/TIP.2016.2639450.
- [34] X. Ren, W. Yang, W. -H. Cheng and J. Liu, "LR3M: Robust Low-Light Enhancement via Low-Rank Regularized Retinex Model," in *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 29, pp. 5862-5876, 2020, doi: 10.1109/TIP.2020.2984098.
- [35] J. Xu et al., "STAR: A Structure and Texture Aware Retinex Model," in *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 29, pp. 5022-5037, 2020, doi: 10.1109/TIP.2020.2974060.
- [36] Li, W., Xiong, B., Ou, Q., Long, X., Zhu, J., Chen, J., and Wen, S. Zero-Shot Enhancement of Low-Light Image Based on Retinex Decomposition. *arXiv preprint arXiv:2311.02995*, 2023.
- [37] M.-T. Duong, S. Lee and M.-C. Hong, "DMT-Net: Deep Multiple Networks for Low-Light Image Enhancement Based on Retinex Model," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 132147-132161, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3336411.
- [38] J. Wen, C. Wu, T. Zhang, Y. Yu and P. Swierczynski, "Self-Reference Deep Adaptive Curve Estimation for Low-Light Image Enhancement," *arXiv preprint arXiv:2308.08197*, 2023.
- [39] J. Hai, Z. Xuan, R. Yang, Y. Hao, F. Zou, F. Lin and S. Han, "R2rnet: Low-light image enhancement via real-low to real-normal network," *Journal of Visual Communication and Image Representation*, vol.90, February 2023.
- [40] M. Zhu, P. Pan, W. Chen and Y. Yang, "EEMEFN: Low-light image enhancement via edge-enhanced multi-exposure fusion network", *Proc. AAAI Conf. Artif. Intell.*, pp. 13 106-13 113, 2020.
- [41] Y. Fu, Y. Hong, L. Chen and S. You, "LE-GAN: Unsupervised low-light image enhancement network using attention module and identity invariant loss," *Knowledge-Based Systems*, vol.240, 2022.
- [42] H. Shakibania, S. Raoufi, H. Khotanlou, "CDAN: Convolutional Dense Attention-guided Network for Low-light Image Enhancement," *arXiv preprint arXiv:2308.12902*, 2023.
- [43] Y. Zhang, X. Di, J. Wu, R. FU, Y. Li, Y. Wang, Y. Xu, G. YANG, and C. Wang, "A fast and lightweight network for low-light image enhancement," *arXiv preprint arXiv:2304.02978*, 2023.
- [44] S. Xie and Z. Tu, "Holistically-nested edge detection", *Proc. IEEE Int. Conf. Comput. Vis. (ICCV)*, pp. 1395-1403, Dec. 2015.
- [45] J. Canny, "A Computational Approach to Edge Detection," in *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. PAMI-8, no. 6, pp. 679-698, Nov. 1986, doi: 10.1109/TPAMI.1986.4767851.
- [46] L. G. Roberts, "Machine perception of 3-D solids, optical and electro-optical information processing", MIT Press, 1965.
- [47] J. M. Prewitt, "Object enhancement and extraction", *Picture Process. Psychopictorics*, vol. 10, no. 1, pp. 15-19, 1970.
- [48] I.Sobel, *Camera models and machine perception*, 1970.

- [49] X.-X. Yin, L. Sun, Y. Fu, R. Lu and Y. Zhang, "UNet-based medical image segmentation", *J. Healthcare Eng.*, vol. 2022, pp. 1-16, Apr. 2022.
- [50] O. Ronneberger, P. Fischer and T. Brox, "U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation", *Proc. 18th Int. Conf. Med. Image Comput. Comput. -Assist. Interv.*, pp. 234-241, 2015.
- [51] Y. Zhang, J. Zhang and X. Guo, "Kindling the darkness: A practical low-light image enhancer" in *arXiv:1905.04161*, 2019, [online] Available: <http://arxiv.org/abs/1905.04161>.
- [52] Z. Jiang et al., "A switched view of retinex: Deep self-regularized low-light image enhancement", *Neurocomputing*, vol. 454, pp. 361-372, 2021.
- [53] C. C. Lim, Y. P. Loh, and L. K. Wong, "LAU-Net: A low light image enhancer with attention and resizing mechanisms," *Signal Processing: Image Communication*, vol.115, 2023.
- [54] X. Liang, X Chen, K. Ren, X. Miao, Z. Chen, and Y. Jin "Low-light image enhancement via adaptive frequency decomposition network," *Scientific Reports*, 2023.
- [55] S. W. Zamir et al., "Learning enriched features for real image restoration and enhancement", *Proc. Eur. Conf. Comput. Vis.*, pp. 492-511, 2020.
- [56] A. Horé and D. Ziou, "Image Quality Metrics: PSNR vs. SSIM," 2010 20th International Conference on Pattern Recognition, Istanbul, Turkey, 2010, pp. 2366-2369, doi: 10.1109/ICPR.2010.579.
- [57] U. Sara, M. Akter and M. S. Uddin, "Image quality assessment through FSIM SSIM MSE and PSNR—A comparative study", *J. Comput. Commun.*, vol. 7, no. 3, pp. 8-18, 2019.
- [58] A. Mittal, A. K. Moorthy and A. C. Bovik, "No-Reference Image Quality Assessment in the Spatial Domain," in *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 21, no. 12, pp. 4695-4708, Dec. 2012, doi: 10.1109/TIP.2012.2214050.
- [59] A. Mittal, R. Soundararajan and A. C. Bovik, "Making a "Completely Blind" Image Quality Analyzer," in *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 20, no. 3, pp. 209-212, March 2013, doi: 10.1109/LSP.2012.2227726.
- [60] C. Wei, W. Wang and W. Yang, "Deep Retinex decomposition for low-light enhancement", *Proc. Brit. Mach. Vis. Conf.*, pp. 1-12, 2018.
- [61] D. Dang-Nguyen, C. Pasquini, V. Conotter and G. Boato, "RAISE: A raw images dataset for digital image forensics", *Proc. 6th ACM Multimedia Syst. Conf.*, pp. 219-1224, 2015.
- [62] Y. Zhang, X. Di, B. Zhang and C. Wang, "Self-supervised image enhancement network: Training with low light images only", *arXiv:2002.11300*, 2020.



Controlling the Mobile Robot with the Pure Pursuit Algorithm to Tracking the Reference Path Sent from the Android Device

Ahmet TOP^{1*}

¹ Firat University, Faculty of Technology, Electrical-Electronics Engineering Department, atop@firat.edu.tr, Orcid No: 0000-0001-6672-2119

ARTICLE INFO

Article history:

Received 4 January 2024
Received in revised form 26 February 2024
Accepted 27 February 2024
Available online 29 March 2024

Keywords:

Communication, Mobile robot,
Android application, Pure pursuit
algorithm

Doi: 10.24012/dumf.1414768

* Corresponding author

ABSTRACT

Many of the equipment and machines we use in our everyday lives have changed due to major advancements in today's technology. Smartphones, which have made great progress especially in the last decade, perform many tasks in addition to interpersonal communication. Controlling robots, which are increasingly used in daily life and widely included in the literature, is one of these tasks. In this study, the pure pursuit algorithm was used to control the position of a non-holonomic differential drive mobile robot, and the path information to be tracked was received from an Android mobile device as a reference. An application design has been carried out for Android devices. The information for the path drawn here was transferred via the internet to a Google Spreadsheet. Coordinate information obtained from Google tables in MATLAB was separated as x and y axis information and entered into MATLAB/Simulink as waypoints of the pure pursuit algorithm and the position control of the robot was carried out. Error analysis was made by taking the differences between the reference path and the actual movement and the control performance was examined. Additionally, the effect of the approach distance value of the pure pursuit algorithm on the error is presented.

Introduction

Mobile robots have been used effectively in the last decade to perform important tasks in many fields, including military, industrial, and security environments [1,2]. In recent years, as more and more application areas have been opened for robots, production efficiency has increased, manpower has decreased and working environments have improved [3]. There are many types of robots and their tasks. Automating operations like material handling in warehouses, luggage collecting at airports, and mobile security inspection robots are common uses for ground robots. Underwater robots are commonly used to perform sampling, testing, installation, maintenance, and overhaul of groundwater environments, marine environments, and lake and river water environments. Aerial robots are often used to perform aerial search and rescue, search terrain data collection, airborne remote sensing, and other tasks [4,5]. Among these, wheeled mobile robots are used in most applications due to their many advantages such as being fast, having high accuracy, and performing repetitive and difficult tasks easily. These robots are divided into holonomic and non-holonomic wheeled mobile robots. While non-holonomic robots have 2 degrees of freedom

(DOF) linear movement in the x-axis and rotational movement in the z-axis, holonomic robots have 3 degrees of freedom because they can also move in the y-axis [6]. Holonomic robots are also called mecanum and omni-wheel. Although these seem more advantageous, their disadvantages are that they are expensive, slow, and slippage [7]. Non-holonomic robots are generally used with differential drive and are called differential drive wheeled mobile robots (DDWMR). DDWMRs can be designed as 2-wheel [8], 3-wheel [9], 4-wheel [10] or 6-wheel [11]. 3-wheeled DDWMRs, which can be controlled more easily thanks to their high maneuverability, are widely used. It consists of two motorized wheels and one caster wheel [12].

One of the most fundamental issues that need to be solved for mobile robots to move and explore on their own in complex environments is path planning [13]. The mobile robot searches for an optimal or suboptimal path from the initial state to the goal state based on certain performance criteria. This is known as the path planning problem [14]. When used properly, path planning techniques for mobile robots can save wear and tear as well as capital costs and save a lot of time. Therefore, the correct choice of navigation technique is the most important step in robot

path planning [15]. There are many position control algorithms such as improved Monte Carlo, pure pursuit, Markov, and Kalman filtering [16]. Of these, the pure pursuit algorithm (PPA) is one of the first. In essence, it is an algorithm that moves to a predetermined point in the distance, concentrates on it, and then approximates its trajectory [17].

In addition to robot design and control, information exchange and control parameters must be sent between the robot and the user. In simulation studies, this process is done directly through the program. However, in practical studies, it can be sent remotely via a computer or a console. However, in this case, since additional hardware is needed, it would be more appropriate to use Android applications in terms of both reducing cost and ease of use. Billions of people around the world use smartphones and this number is increasing rapidly every day. For this reason, mobile applications are preferred for remote access in terms of ease of development. With a single application on a device, other devices can be efficiently managed and monitored [18]. The majority of these devices used are devices with the Android operating system. MIT App Inventor, which enables the creation of application software for Android systems, is an application originally provided by Google and now maintained by the Massachusetts Institute of Technology (MIT). It uses a graphical interface very similar to a block-based visual programming language and allows users to drag and drop visual objects to create an application that can run on the Android system [19]. Robot control with Android applications has received a lot of attention in the literature since Android phones and robot studies have become more and more important in today's world. Aktas et al. [20], in their study, controlled the mobile robot they created with a 3D printer using Wi-Fi and Bluetooth communication with an Android application. Fahmidur et al. [21] controlled the robot via Bluetooth by mirroring the Android phone screen to the computer with the Mobizen application. Singporn and Kamon [22] used the MIT App Inventor platform to create a mobile application interface that controls a line-following delivery robot via Bluetooth. Bingöl et al. [23] conducted a study on Bluetooth-controlled wheelchair control with an Android device to facilitate the lives of disabled people. Saravanan et al. [24] studied robot control with voice using Arduino and Android platforms.

In this study, the pure pursuit algorithm was used to control the 3-wheeled DDWMR's position. In contrast to the research in the literature, the algorithm input is provided with a path rather than a few coordinate notices where the robot is given directions to move. An Android application that was developed was used to carry out this path. The application interface has a coordinate system on which the user can design the path they want the robot to take. They can choose three different colors and the appropriate thickness for their path. He/she can also snap a photo of the area wishes to go by turning on the camera, and then use that image to design a reference

path. The x and y coordinate values of the created reference are stored for a certain period with the Android application and when the send button is pressed, they are automatically transferred to the Excel table in Google Spreadsheets, thanks to the easy sharing and real-time editing feature [25]. Arrays were created for x and y coordinates with these values taken from Spreadsheets in the MATLAB program, and these values were applied to the PPA as a waypoint in the control simulation created in MATLAB/Simulink and the robot was controlled. Position controls were provided by sending different paths, and error analyses were also performed by repeating the examinations between the reference path sent from the device and the actual movement for different lookahead values.

Differential drive wheeled mobile robot

In this study, a 3-wheeled mobile robot was used. While there is a standard wheel connected to the right and left motors, there is a caster wheel on the front of the robot that can rotate freely and ensure the balance of the robot. Since it is a non-holonomic robot, it has 2 DOF. For this reason, it can move linearly in the x-axis and rotationally in the z-axis according to the {R} coordinate, as seen in Figure 1. The linear speeds of the right and left motors are V_R and V_L , respectively, and they depend on the radius (r) and angular speed of the wheels, as shown in Equation 1.

$$V_R = r \cdot \omega_R \quad , \quad V_L = r \cdot \omega_L \quad (1)$$

The linear speed of the robot is the average speed of the speeds in the x and y axes. However, since the speed of the robot on the y-axis is zero, that is, there is no lateral slip, the average of the right and left linear speeds gives the linear speed of the robot as in Equation 2.

$$V = V_x = \frac{V_R + V_L}{2} = \frac{r}{2}(\omega_R + \omega_L) \quad (2)$$

The rotation of the robot occurs in a semicircle according to the effect of the linear speed on the wheels on the center of gravity of the mobile robot. When moving on the circle, clockwise is negative, and counterclockwise is positive. In this case, the angular speed of the robot is calculated according to Equation 3.

$$\omega = \frac{V_R - V_L}{L} = \frac{r}{L}(\omega_R - \omega_L) \quad (3)$$

If the angular velocities of the wheels are distinguished from the equations created here, the inverse kinematic equations in Equations 4 and 5 are obtained.

$$w_L = \frac{1}{r} \left(V - \frac{wL}{2} \right) \quad (4)$$

$$w_R = \frac{1}{r} \left(V + \frac{wL}{2} \right) \quad (5)$$

where w is the angular speed of the robot (rad/sec), V is the linear speed of the robot (m/s), L is the distance between the two wheels (m), and w_L and w_R are the angular speeds of the left and right wheels (rad/sec), respectively.

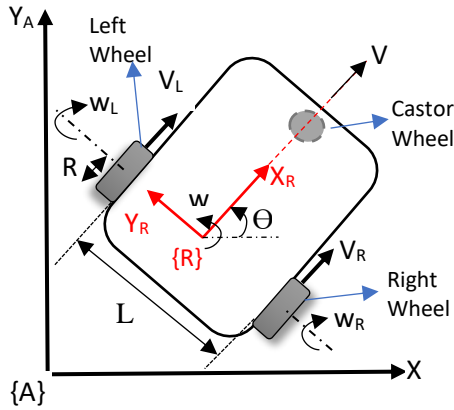


Figure 1. DDWMR motion axis

Looking at the forward kinematic equations in Equations 2 and 3, it is necessary to adjust the angular velocities of the wheels to control the linear and angular velocities of the robot. If the motors to which the wheels are connected are adjusted in the opposite direction and at the same speed, the robot goes forward or backward. If it is turned in the same direction, the robot moves by turning right or left.

Pure pursuit algorithm

The main purpose of position control algorithms is to ensure that the mobile robot moves without deviating from the path. There are many predictive, probabilistic, and geometric-based algorithms developed for this purpose. PPA is a geometric-based algorithm developed in the 1980s for this purpose [26]. The basic logic of the PPA is to determine a lookahead at which it will move, as in humans, and to move by adjusting its speed and orientation to the target point according to its location. It consists of two inputs, the robot's position and target position, and two outputs, the robot's linear and angular speed. As seen in Figure 2, the shortest distance is calculated according to the current position of the robot x_r , y_r , and the target points given to the robot, x_a and y_a , as in Equation 6. After the angle between the robot's position and the target is calculated with Equation 7, the algorithm determines at what linear and angular speeds the robot will move at its output. These speed values are converted into angular velocities for the motors with

inverse kinematic equations and this information is sent to the motors. It reaches the final point by updating this information during movement [27].

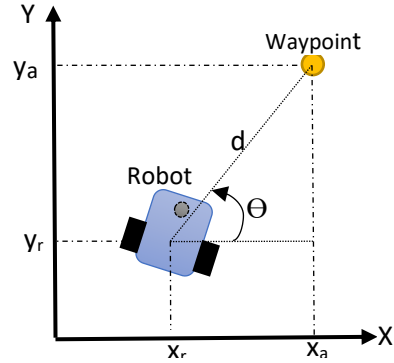


Figure 2. Pure Pursuit approach

$$d = \sqrt{(x_r - x_a)^2 + (y_r - y_a)^2} \quad (6)$$

$$\theta = \text{atan2}((y_a - y_r), (x_a - x_r)) \quad (7)$$

where d is the closest distance between two points, and theta angle represents the angle between two points. The lookahead parameter has an important place for calculations close to the trajectory. When the lookahead parameter is selected large, a wider-angle, smoother, and less oscillating path is followed, as shown in Figure 3 (a). However, in this case, since there will be a lot of deviation from the trajectory in sharp turns, the movement route will be longer, and undesirable long-distance advances will occur. When the lookahead parameter is selected small, oscillations will occur as maneuvers will be made to each viewpoint, as shown in Figure 3 (b). Increasing the oscillation will cause the motors to make sudden speed changes. For these reasons, choosing the lookahead parameter correctly for the trajectories used will increase performance [28].

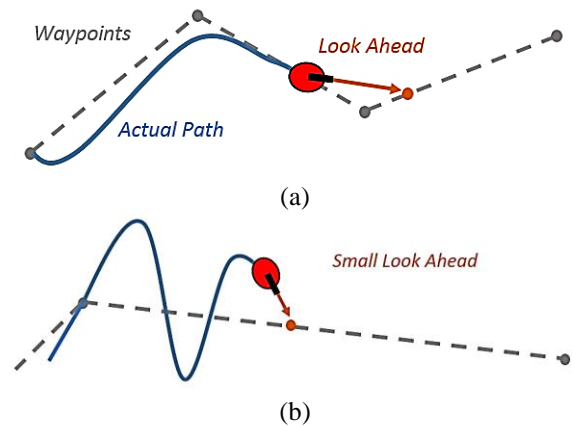
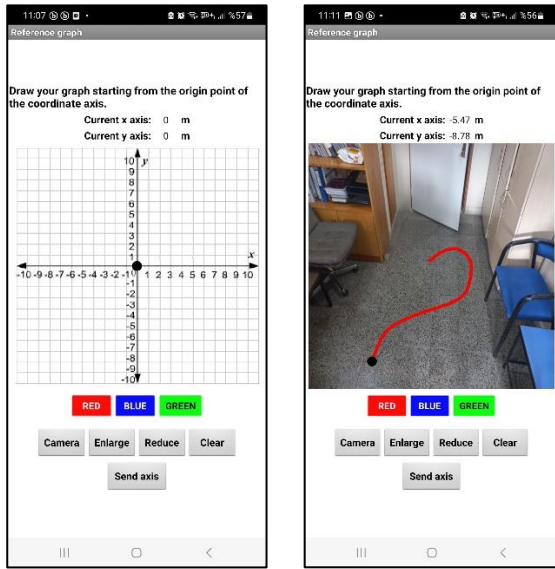


Figure 3. Use of the Lookahead parameter a) large lookahead, b) small lookahead

Android application

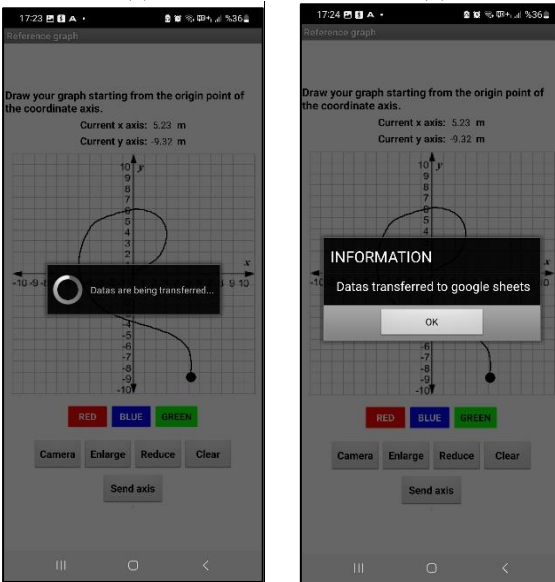
An Android-based application has been developed to send the reference path that the robot will follow. The application's main screen is shown in Figure 4 (a). An area of 10 m was created for four regions of the coordinate plane. Here, the user has the option of by hand or by using a stylus to draw the course he/she wishes the robot to go. Red, blue, and green colors can be selected with the three color buttons located under the drawing area. When the camera button is pressed, the camera is

turned on and the photo taken is displayed in the drawing area. In this case, the user can draw a path on the photograph taken as in Figure 4 (b). Additionally, line thickness can be increased or decreased with the expansion and reduction buttons. The drawing screen can also be cleared with the clear button. The information on the drawn path is kept as a list in the background, as seen in the instant x-y coordinate information window above. When the send button at the bottom is pressed, this list is transferred to the file created in Google Spreadsheets with information notes in Figure 4 (c).



(a)

(b)



(c)

Figure 4. Android application main screen a) drawing on the coordinate axis, b) drawing on the camera image c) information share notes

As shown in the appendices, the application software can be separated into three main parts. Those that follow:

1. Initial variables and settings are made in this section. This is where lists, main screen settings, and axis information beginning values are configured.
2. The part where the button and its operations take place. This is the section where the operations that will take place when the buttons on the main screen are pressed.
3. This is the part used for situations that occur at the time of drawing. It contains the actions that will occur when the ball moves in the drawing area.

Acquisition of data and modeling of control

There are two steps to this section of the study. As illustrated in the workflow diagram in Figure 5, the first section involves obtaining the data from Google Spreadsheets, assigning reference values to arrays, and graphing the Simulink data. Using the provided coordinate data and the simulation PPA shown in Figure 6, the second phase involves using the PPA.

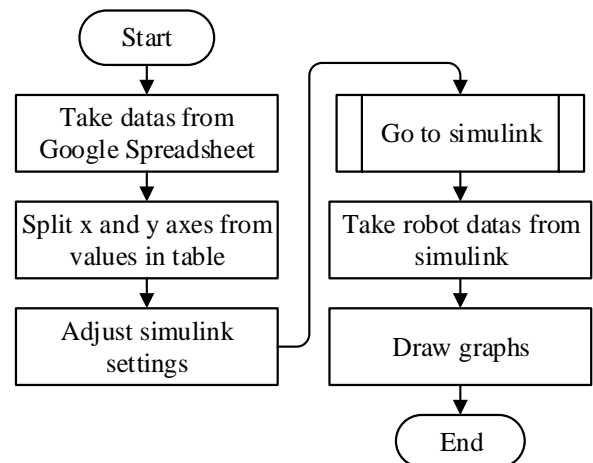


Figure 5. The process of visualizing the outcomes after importing data from Google Spreadsheets

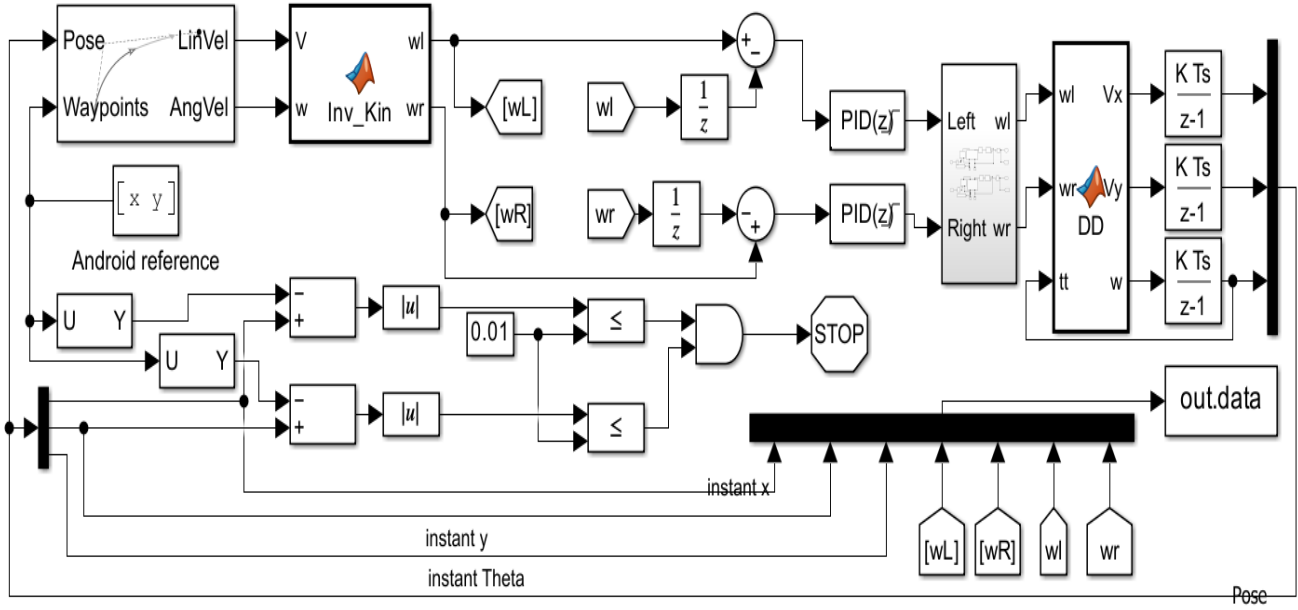


Figure 6. Robot control blocks in Simulink

Instant pose information taken from the robot and reference points taken from the m-file were given as input to the PPA, and the reference linear and angular velocities of the robot were taken from the output. These values were converted into right and left motor reference speeds with inverse kinematic equations, and the motors whose blocks are given in Figure 7 were controlled with the PID controller. The instantaneous speed information of the motors was applied as input to the DD block and was converted back into robot linear and angular speed with the forward kinematic equations in Equations 2 and 3. By multiplying these velocities with the rotation matrix in Equation 8, the velocities in the x and y directions and the angular velocity were found. At the DD block output, position and angle information was obtained by taking their integrals. Since the robot is 2-DOF, the speed in the y direction is zero.

$$Pose = \int \begin{bmatrix} \cos(tt) & -\sin(tt) & 0 \\ \sin(tt) & \cos(tt) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_x \\ 0 \\ w \end{bmatrix} \quad (8)$$

By comparing the last reference information and location information, the simulation was stopped with the stop block when the desired range was reached. Robot information was collected via the “to workspace” block and transferred to m-file and graphs of the data were drawn.

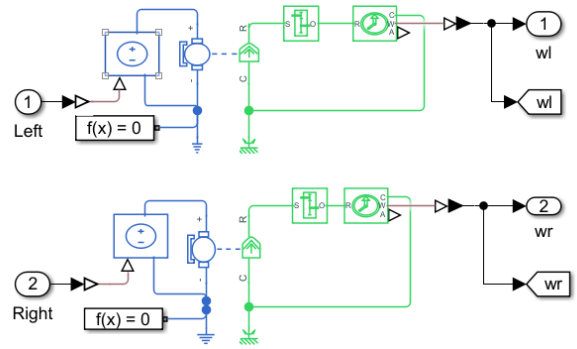


Figure 7: Motor blocks

Implementation of Android application and PPA

Figure 8 illustrates the system's general functioning concept. Through Wi-Fi, the data from the path painted on the Android device was sent to Google Spreadsheets. These data were parsed into x and y arrays after being imported into MATLAB via Wi-Fi using a program written in an m-file.

The created coordinate data was transferred to the Simulink program and applied as input data to the pure pursuit algorithm. When the location control was completed, the data was transferred back to the m-file, and graphs were drawn. Android device and MATLAB outputs for different reference paths are presented in Figure 9.

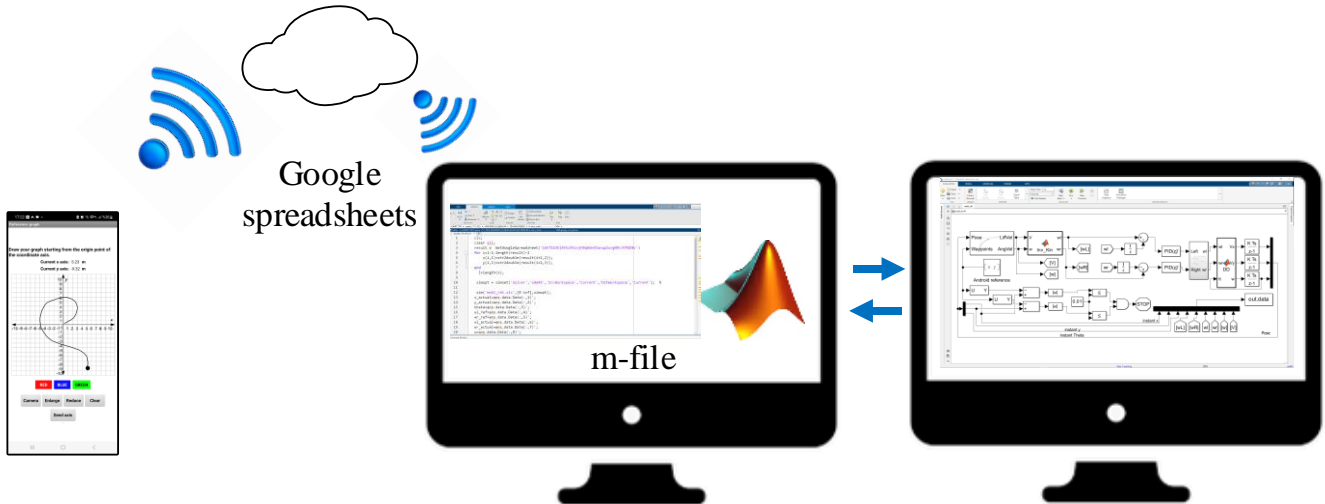


Figure 8. Block diagram of the connection between MATLAB and Android device

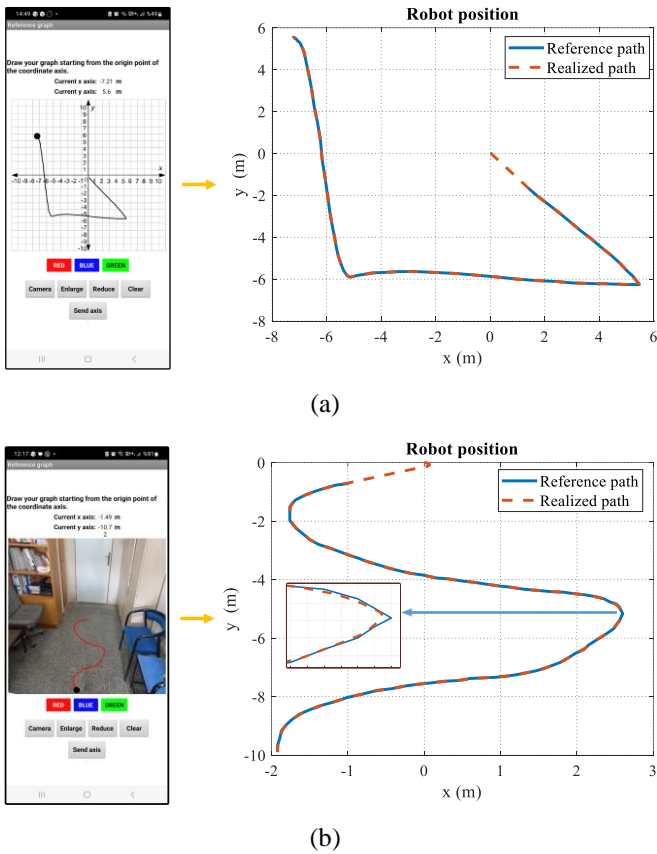


Figure 9. Results for different reference paths a) In the coordinate system and b) in the camera view

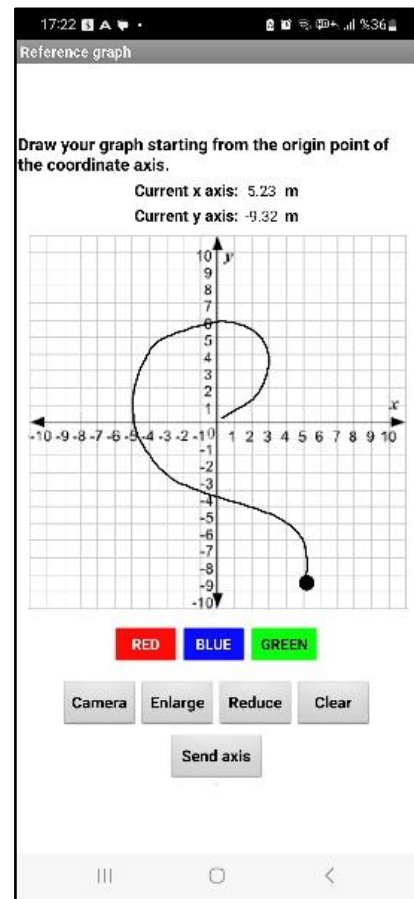


Figure 10. Reference path sent for robot position control

Using the reference path shown in Figure 10, position control was carried out for a maximum of 3 rad/s angular speed, 0.2 m/s linear speed, and 0.1 m lookahead distance. The results, which indicate the robot position, position error, and wheel speeds in Figure 11, were obtained.

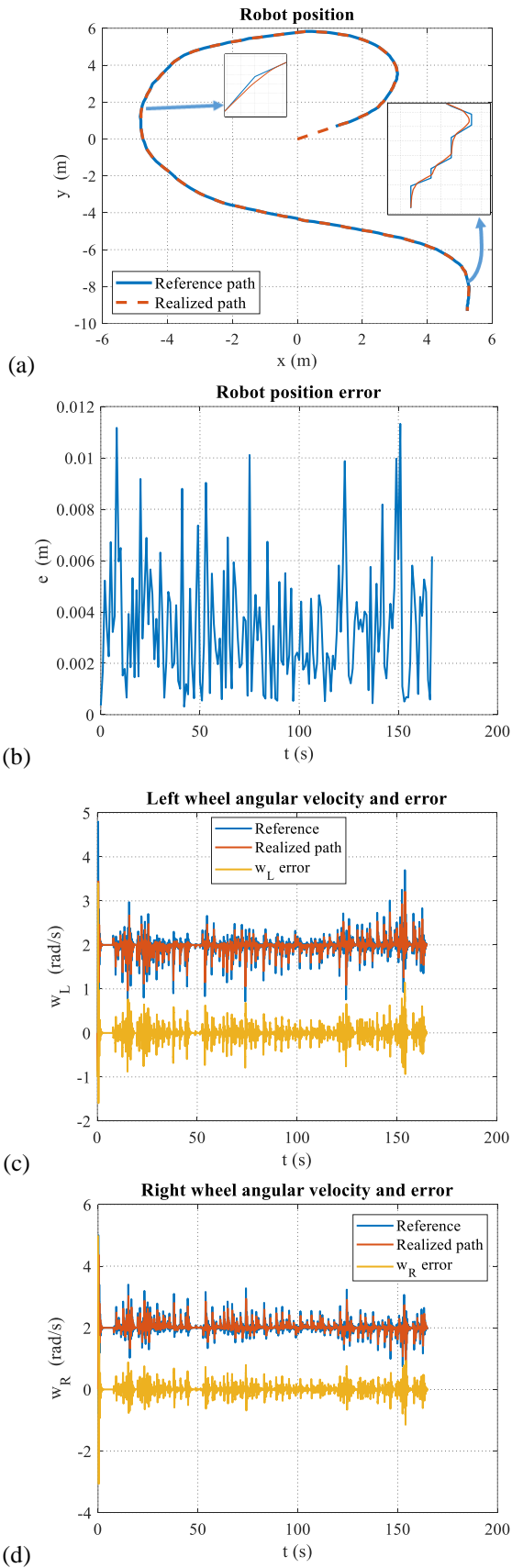


Figure 11. DDWMR position control results: a) path tracking, b) Path tracking error, c) left wheel velocity, d) right wheel velocity

Analyzing the data shows that the robot followed the reference path with a mean error of 0.0034 m and a maximum error of 0.0113 m. The robot's left wheel followed the reference with an angular velocity error of 1.14 rad/s and its right wheel followed the reference with an angular velocity error of 1.7 rad/s for the remaining states after the inertia from the initial movement was eliminated. Figures 12 and 13 show the results for various lookahead distances and the same reference road.

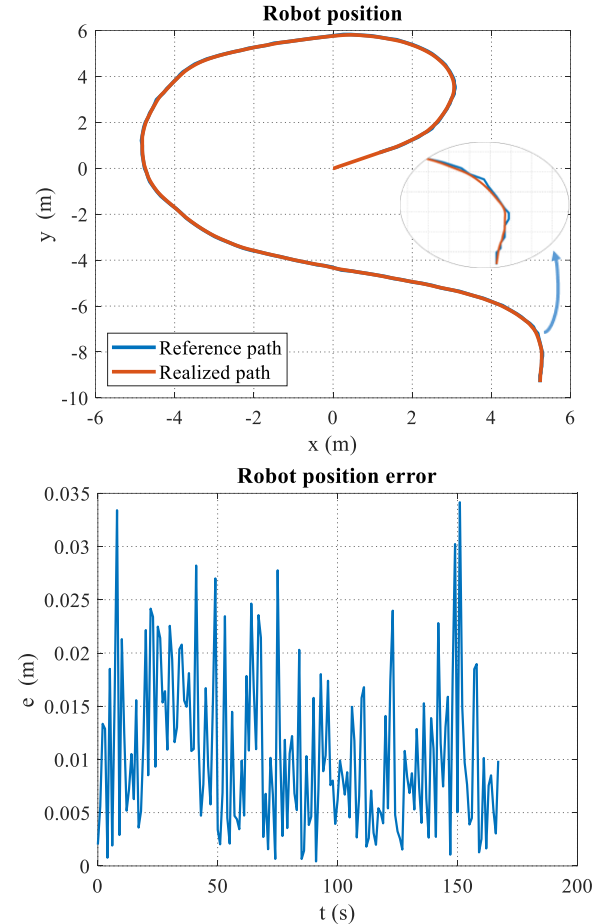


Figure 12. Position control of DDWMR for Lookahead=0.3 m

Table 1. Robot position errors according to different lookahead distances

Lookahead (m)	Maximum error (m)	Mean error (m)
0.1	0.011	0.0034
0.3	0.0113	0.010
0.5	0.0644	0.0243
0.75	0.1118	0.0513
1	0.1759	0.0886

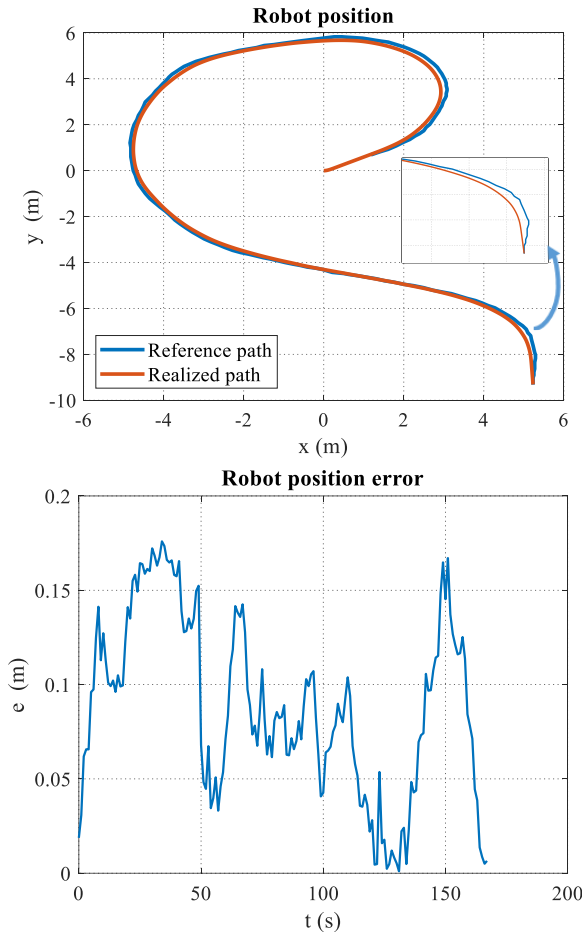


Figure 13. Position control of DDWMR for Lookahead=1 m

The largest difference between the reference path and the actual path was 0.034 m, and the mean error was 0.010 m when the lookahead distance was set to 0.3 m. The maximum and mean errors for the identical scenario, where the lookahead distance is established for 0.5 m, 0.75 m, and 1 m values, are shown in Table 1.

As can be seen from the table, as the lookahead value increases, the error values between the reference and actual position values also increase since the robot follows the reference values from a farther distance.

Conclusion

In the present study, the pure pursuit algorithm was used to control the position of a non-holonomic robot, and an Android application was created to ascertain the reference path. The reference path that the robot wishes to follow in the application created with MIT App Inventor is drawn on the coordinate axis in the drawing area or on an image that can be captured by the camera. Every 500 ms, the path's x and y coordinate values were obtained and added to an array. These coordinate data were transferred via Wi-Fi to the previously established and configured Google Spreadsheet when the application's send button was activated. With the aid of code, these values which became available in Google Spreadsheets over Wi-Fi were moved to a MATLAB m-file, and the axes were split. These reference values were used as waypoints in a MATLAB/Simulink using an m-file to enable pure pursuit to control the robot's location and PID to control its speed. The simulation's output data were imported back

into the m-file, where graphs showing the robot's position, velocity, and error values were created. It was observed in the study that the controllers successfully controlled the robot's position and that the data was accurately sent from the Android application. Furthermore, it has been observed that as the lookahead distance increases, the robot's reference tracking error increases. One of the study's advantages is that reference values may be sent to the robot without the requirement for extra equipment. Both the need for extra modules and the Bluetooth short-range reception issue are avoided by using the internet for communication instead of Bluetooth. In addition, when the period time is reduced to get more data from the drawing screen in the Android application, errors occur because values are added to the lists at the same time while drawing. In addition, when drawing slowly to get more data, deviations occur in the data because it detects different points on the finger. For this reason, 500 ms was determined as the optimum time to get more accurate results with a fast drawing. Since the reference coordinates are very close to each other, it moves in constant oscillation as it changes direction at a value very close to the reference at lookahead values below 0.1 m. Therefore, the value of 0.1 m was determined as the lower limit for this study.

Ethics Committee Approval

There is no need to obtain permission from the ethics committee for the article prepared.

Conflict of Interest Statement

There is no conflict of interest with any person/institution in the article prepared.

References

- [1] B. Tang, Z. Zhu, and J. Luo, "Hybridizing Particle Swarm Optimization and Differential Evolution for the Mobile Robot Global Path Planning," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 13, no. 3, p. 86, Jan. 2016, doi: <https://doi.org/10.5772/63812>.
- [2] M. N. A. Wahab, S. Nefti-Meziani, and A. Atyabi, "A comparative review on mobile robot path planning: Classical or meta-heuristic methods" *Annual Reviews in Control*, Oct. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2020.10.001>.
- [3] S. Lin, A. Liu, J. Wang, and X. Kong, "A Review of Path-Planning Approaches for Multiple Mobile Robots," *Machines*, vol. 10, no. 9, p. 773, Sep. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/machines10090773>.
- [4] F. Gul, I. Mir, L. Abualigah, P. Sumari, and A. Forestiero, "A Consolidated Review of Path Planning and Optimization Techniques: Technical Perspectives and Future Directions," *Electronics*, vol. 10, no. 18, p. 2250, Sep. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/electronics10182250>.
- [5] C. Liu, J. Zhao, and N. Sun, "A Review of Collaborative Air-Ground Robots Research," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 106, no. 3, Oct. 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s10846-022-01756-4>.

- [6] S. Mellah, G. Graton, E. M. El Adel, M. Ouladsine and A. Planchais, "Actuator Health State Monitoring & Degradation Impact Study on a 4-Mecanum Wheeled Mobile Robot Behaviour," *2021 29th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, PUGLIA, Italy, 2021, pp. 1076-1081, doi: 10.1109/MED51440.2021.9480231..
- [7] Z. Sun, H. Xie, J. Zheng, Z. Man, and D. He, "Path-following control of Mecanum-wheels omnidirectional mobile robots using nonsingular terminal sliding mode," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 147, p. 107128, Jan. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107128>.
- [8] R. P. M. Chan, K. A. Stol, and C. R. Halkyard, "Review of modeling and control of two-wheeled robots," *Annual Reviews in Control*, vol. 37, no. 1, pp. 89–103, Apr. 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2013.03.004>.
- [9] S. Peng and W. Shi, "Adaptive Fuzzy Output Feedback Control of a Nonholonomic Wheeled Mobile Robot," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 43414-43424, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2862163.
- [10] M. Begnini, D. W. Bertol, and N. A. Martins, "A robust adaptive fuzzy variable structure tracking control for the wheeled mobile robot: Simulation and experimental results," *Control Engineering Practice*, vol. 64, pp. 27–43, Jul. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2017.04.006>.
- [11] H. Zhao, C. Luo, Y. Xu, and J. Li, "Differential Steering Control for 6 × 6 Wheel-drive Mobile Robot," *2021 26th International Conference on Automation and Computing (ICAC)*, Portsmouth, United Kingdom, 2021, pp. 1-6, doi: 10.23919/ICAC50006.2021.9594210.
- [12] P. Petrov and V. Georgieva, "Adaptive Velocity Control for a Differential Drive Mobile Robot," *2018 20th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)*, Bourgas, Bulgaria, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/SIELA.2018.8447091.
- [13] G. Klančar, A. Zdešar, and M. Krishnan, "Robot Navigation Based on Potential Field and Gradient Obtained by Bilinear Interpolation and a Grid-Based Search," *Sensors*, vol. 22, no. 9, p. 3295, Apr. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/s22093295>.
- [14] M. A. Contreras-Cruz, V. Ayala-Ramirez, and U. H. Hernandez-Belmonte, "Mobile robot path planning using artificial bee colony and evolutionary programming," *Applied Soft Computing*, vol. 30, pp. 319–328, May 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.01.067>.
- [15] H. Qin, S. Shao, T. Wang, X. Yu, Y. Jiang, and Z. Cao, "Review of Autonomous Path Planning Algorithms for Mobile Robots," *Drones*, vol. 7, no. 3, pp. 211–211, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/drones7030211>.
- [16] S. K., Malu, & J. Majumdar, "Kinematics, localization and control of differential drive mobile robot". *Global Journal of Research In Engineering*, 14(1), 1-9. 2014
- [17] M. Samuel, M. Maziah, M. Hussien, and N. Y. Godi, "Control of Autonomous Vehicle Using Path Tracking: A Review," *Advanced Science Letters*, vol. 24, no. 6, pp. 3877–3879, Jun. 2018, doi: <https://doi.org/10.1166/asl.2018.11502>.
- [18] S. Hong, "An Efficient Iot Application Development Based On Iot Knowledge Modules," *Issues In Information Systems*, 2020, doi: https://doi.org/10.48009/3_iis_2020_72-82.
- [19] E. Pasternak, R. Fenichel, and A. N. Marshall, "Tips for creating a block language with blockly," *2017 IEEE Blocks and Beyond Workshop (B&B)*, Raleigh, NC, USA, 2017, pp. 21-24, doi: 10.1109/BLOCKS.2017.8120404.
- [20] M. Aktaş, F. Polat, and M. Oflezer, "Bluetooth Ve Wifi Kontrollü Mobil Robot Tasarımı Ve Uygulaması", *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, vol. 7, no. 3, pp. 29–35, 2018.
- [21] R. K. Fahmidur, H. M. A. Munaim, S. M. Tanvir and A. S. Sayem, "Internet controlled robot: A simple approach," *2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*, Chennai, India, 2016, pp. 1190-1194, doi: 10.1109/ICEEOT.2016.7754873.
- [22] P., Singporn, & S. Kamon, "Controlling the Line Follower Delivery Robot with MIT APP Inventor". *Journal of Technology and Innovation in Tertiary Education*, 1(1), 9-16, 2018
- [23] O. Bingöl, Ö. Aydoğan, B. Özkaya, N. Şen, "Android Cihaz ile Tekerlekli Sandalye Kontrolü", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, Özel Sayı* (164-169). 2016
- [24] M. Saravanan, B. Selvababu, A. Jayan, A. Anand, and A. Raj, "Arduino Based Voice Controlled Robot Vehicle," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 993, p. 012125, Dec. 2020, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/993/1/012125>.
- [25] Google Sheets features, Access Date: 01 January 2024 <https://www.google.com/sheets/about/>
- [26] M. Samuel, M. Maziah, M. Hussien, and N. Y. Godi, "Control of Autonomous Vehicle Using Path Tracking: A Review," *Advanced Science Letters*, vol. 24, no. 6, pp. 3877–3879, Jun. 2018, doi: <https://doi.org/10.1166/asl.2018.11502>.
- [27] G. GÜRĞÜZE, & İ. TÜRKOĞLU, "Dinamik Modeli Bilinen Diferansiyel Mobil Robotun Pure Pursuit Algoritması İle Pozisyon Kontrolünün Yapılması", *International Congress on HumanComputer Interaction, Optimization and Robotic Applications*, 2019
- [28] -J. Wang, T. -M. Hsu and T. -S. Wu, " The improved pure pursuit algorithm for autonomous driving advanced system" *2017 IEEE 10th International Workshop on Computational Intelligence and Applications (IWCIA)*, Hiroshima, Japan, 2017, pp. 33-38, doi: 10.1109/IWCIA.2017.8203557.

Appendix

```

initialize global x_axis_list to create empty list
initialize global y_axis_list to create empty list
initialize global y_intermediate_process to 0
initialize global x_intermediate_process to 0
initialize global index_number to 1
initialize global dot_size to 10
initialize global x_region to 1
initialize global y_region to 1
initialize global x_axis1 to 0
initialize global x_axis2 to 0
initialize global y_axis1 to 0
initialize global y_axis2 to 0

when Screen1.Initialize
do
set Screen1.ScreenOrientation to "Portrait"
set current_x_axis_value.Text to 0
set current_y_axis_value.Text to 0
    
```

(a)

```

when Button_red.Click
do
set Canvas1.PaintColor to red

when Button_blue.Click
do
set Canvas1.PaintColor to blue

when Button_green.Click
do
set Canvas1.PaintColor to green

when Button_enlarge.Click
do
set global dot_size to get global dot_size + 0.5
set Canvas1.LineWidth to get global dot_size + 0.5

when Button_reduce.Click
do
set global dot_size to get global dot_size - 0.5
set Canvas1.LineWidth to get global dot_size - 0.5

when Button_clear.Click
do
call Canvas1.Clear
set Canvas1.BackgroundImage to ekosen.png.crdownload
set current_x_axis_value.Text to 0
set current_y_axis_value.Text to 0
set global x_axis_list to create empty list
set global y_axis_list to create empty list
call Ball1.MoveTo
x 200
y 200

when Camera1.AfterPicture
image
do
set Canvas1.BackgroundImage to get image

when Button_camera.Click
do
call Camera1.TakePicture

when send.Click
do
call Notifier1.ShowProgressDialog
message "Data are being transferred..."
title " "
set Click1.TimerEnabled to true

when Click1.Timer
do
if get global index_number <= length of list list get global x_axis_list
then
call WebViewer1.GoToUrl
url join "https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLScfhSL..."
select list item list get global x_axis_list
index get global index_number
&entry.218411594=
select list item list get global y_axis_list
index get global index_number
set global index_number to get global index_number + 1
else
call Notifier1.DismissProgressDialog
call Notifier1.ShowDialog
message "Data transferred to google sheets"
title "INFORMATION"
buttonText "OK"
set global index_number to 1
set Click1.TimerEnabled to false
    
```

(b)

```

when Ball1 .Dragged
startX  startY  prevX  prevY  currentX  currentY
do
call Canvas1 .DrawLine
  x1  get prevX
  y1  get prevY
  x2  get currentX
  y2  get currentY
call Ball1 .MoveTo
  x  get currentX
  y  get currentY
set global_x_intermediate_process to absolute | get currentX - Canvas1 .Width / 2 | / 17.7
set global_y_intermediate_process to absolute | get currentY - Canvas1 .Height / 2 | / 17.7
set global_x_axis1 to quotient of | round | ⊕ | get global_x_intermediate_process * 100 + 100
set global_x_axis2 to remainder of | round | ⊕ | get global_x_intermediate_process * 100 + 100 / 100
set global_y_axis1 to quotient of | round | ⊕ | get global_y_intermediate_process * 100 + 100
set global_y_axis2 to remainder of | round | ⊕ | get global_y_intermediate_process * 100 + 100 / 100
if ⊕ | get currentX ≥ 200 and | get currentY ≤ 200
then
set global_x_region to 1
set global_y_region to 1
else if ⊕ | get currentX ≤ 200 and | get currentY ≤ 200
then
set global_x_region to -1
set global_y_region to 1
else if ⊕ | get currentX ≤ 200 and | get currentY ≥ 200
then
set global_x_region to -1
set global_y_region to -1
else
set global_x_region to 1
set global_y_region to -1
set current_x_axis_value .Text to ⊕ | ⊕ | get global_x_axis1 + get global_x_axis2 * get global_x_region
set current_y_axis_value .Text to ⊕ | ⊕ | get global_y_axis1 + get global_y_axis2 * get global_y_region
add items to list list get global_x_axis_list
item ⊕ | ⊕ | get global_x_axis1 + get global_x_axis2 * get global_x_region
add items to list list get global_y_axis_list
item ⊕ | ⊕ | get global_y_axis1 + get global_y_axis2 * get global_y_region

```

(c)

a) Initial screen settings, b) button functions, and c) drawing area blocks



Experimental Analysis and Finite Element Modeling of S-Core Sandwich Panel Composites Drop Impact Response

Hasan Murat ÖZTEMİZ^{1*}, Şemsettin TEMİZ²

¹ Kahramanmaraş İstiklal University, Elbistan Vocational School, hmoztemiz@gmail.com, Orcid No: 0000-0002-3609-3777

² Inonu University, Mechanical Engineering Department, semsettin.temiz@inonu.edu.tr, Orcid No 0000-0002-6737-3720

ARTICLE INFO

Article history:

Received 25 September 2023

Received in revised form 3 January 2024

Accepted 15 January 2024

Available online 29 March 2024

Keywords:

Low-velocity drop impact test,
Sandwich panel composites,
Mechanical behavior, S-core, Finite
element modeling

ABSTRACT

Sandwich panel composites have several applications in material technology. The sandwich panel composite material is constructed of stainless steel-316 for the top and bottom plates, aluminum 1050A-0 for the core, and DP-8405 acrylic adhesive for the binding element. The impact behavior of S-core composite sandwich panels was examined using low-velocity drop impact tests and finite element models. Finite element models have been created to characterize the influence of composite element bending behavior on variations. The specific flexural modulus and strength of composite S-core sandwich structures are equivalent to those found in the literature for core structures. As a result, the minimum weight design served as a guideline for producing weight and density-efficient hybrid composite sandwich panels. The energy absorbed in the test findings rose between 15.15% and 30% as the core thickness grew and between 3.571% and 41.34% as the core arrays changed. Impact load-bearing capability increases with varied core heights and array designs.

Doi: 10.24012/dumf.1365978

* Corresponding author

Introduction

Lightness, high strength [1], high fatigue resistance [2], and form retention, structural and impact strength [3-6], high bending stiffness, strength, and energy absorption capacity are all characteristics of composite materials that are employed in engineering applications such as aircraft, transportation, construction, electronics, and the food industry. It is chosen over traditional materials in applications requiring high wear, corrosion resistance, resistance to dynamic impact events, low density, and flexibility to achieve complicated forms [7-9]. Sandwich composites, for example, are favoured in airplane interiors such as floor panels, internal walls, food preparation rooms, and passenger storage racks [10]. In the broad preference for sandwich composite panels, increasing the material and geometric arrangement in the core structure, compression qualities (bending and buckling resistance), shear stiffness, high energy absorption ability [8-11], and lightness are very beneficial. The majority of these components (sandwich panels) are made up of surface materials as well as honeycomb and foam core materials [11-13]. Sandwich composite panels with open-cell core materials, in particular, give multifunctional benefits to the composite material, such as high stiffness and specific

strength [14-15]. Sandwich structure mechanical behavior, performance, and failure mechanisms (compression, shear or indentation failures, separation, and crushing) are determined by the material characteristics and geometry of their respective components (surface plates and core topology design) [6], [9]. With component geometry, high-performance sandwich composite panels may be created [16-18]. Surface materials in sandwich composite panels should be composed of hard components in the sandwich, be resistant to shear and bending loads [19], and be resistant [20] to plane separation [21]. Honeycomb sandwich structures are made up of a substantial core material sandwiched between two thin layers of hard surface material. While the honeycomb core material keeps the sandwich panel's stiffness and energy absorption capabilities, its hollow cellular structure provides lightness to the sandwich panel. In applications requiring high strength, such as automotive and aerospace, honeycomb sandwich composite panels are commonly employed instead of conventional materials [21-23]. A honeycomb profile [24] and chain, pyramid grooved [25], x-type, kagome-type, hybrid, and unique designs [26-28] can be used as the core structural geometry. The energy absorption and damage load performances of composite materials were evaluated and optimized using falling

weight impact tests on different core arrays and core profiles [29-31] to establish the most appropriate design. Changes to the core geometry result in enhancements to the damage mechanisms [32]. The links between damaged formations and changes in core and matrix deformations that occur under various energy loads on the composite material are investigated, and optimal design parameters are identified [33]. The falling weight impact tests of different core array variations of a sandwich composite panel with a unique core design, S-shaped 1050-O series aluminum core structure, 316 stainless steel upper and lower layers, and DP-8405 acrylic adhesive as binding element were investigated experimentally and numerically in this study. They were compared to finite element analysis analyses performed using the package software, and their mechanical behavior was studied.

2. Experimental Method

The surface layer in this investigation was 1 mm thickness, and 170x100 mm dimensions stainless steel-316, while the core material was aluminum 1050A-0 alloy. The bonding ingredient between the bottom-upper plate and the core was DP-8405 acrylic glue. Table 1 shows the physical and mechanical parameters of aluminum 1050A-0 and stainless steel-316.

Table 1. Mechanical properties of Aluminum 1050A-0 and Stainless steel-316 alloys [34-36]

	Aluminum 1050A-0	316-Stainless Steel
Density	2710 kg/m ³	7800 kg/m ³
Tensile Yield Strength	37,94 MPa	200 MPa
Tensile Ultimate Strength	80 MPa	515 MPa
Modulus of Elasticity	69 GPa	200 GPa
Elongation (%)	40	40
Shear Modulus	50 MPa	82 GPa
Poisson Ratio	0,33	0,275

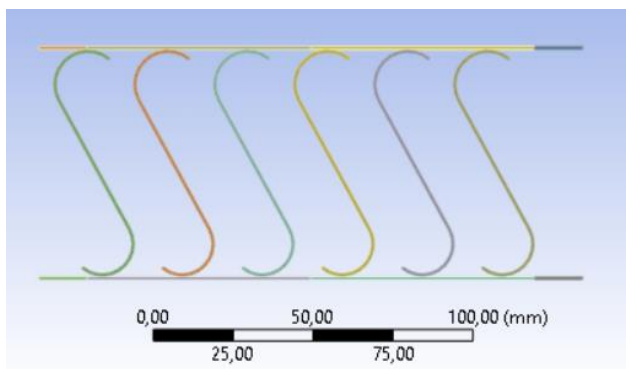


Figure 1. S-core sandwich panel composite drawing view S-core sandwich panel composite with a core height of 70 mm, and thickness of 0.7 mm drawing specimen view is given in Figure 1.

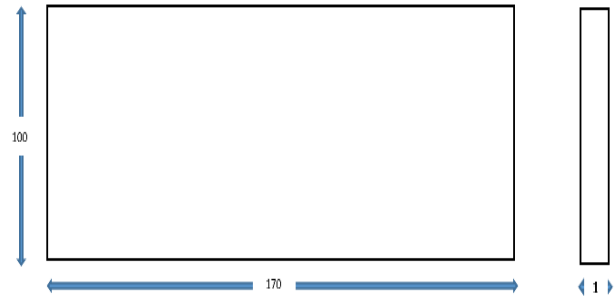


Figure 2. Bottom and top sheet dimensions

The dimensions of the lower and upper plates made of 1mm thickness, and 170x100mm dimensions stainless steel-316 material are given in Figure 2.

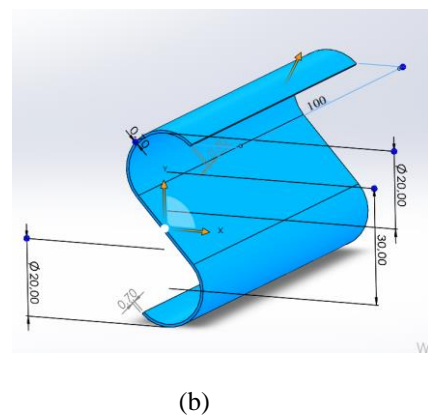
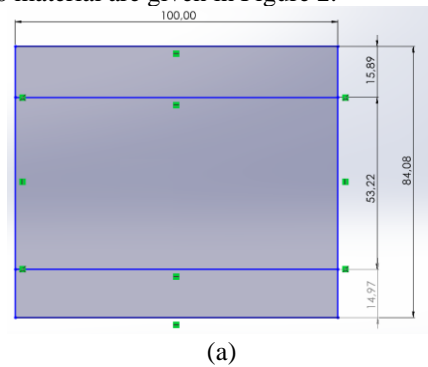
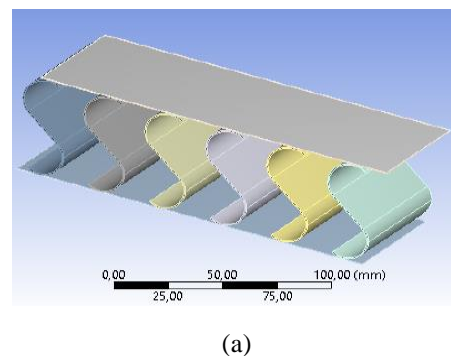
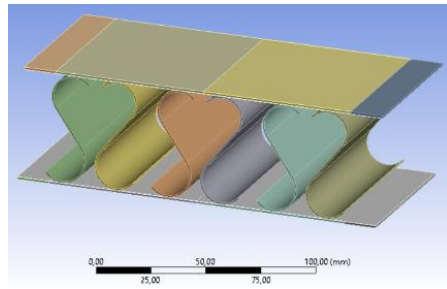
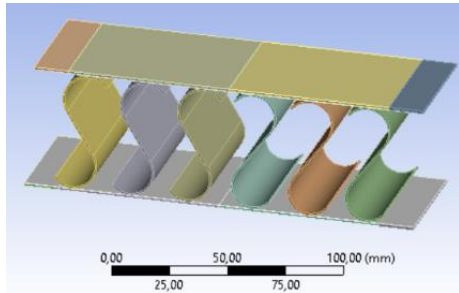


Figure 3. S-core selected for R10mm; a) before bending, b) bending dimensions, c) post bending view The S-core R10mm dimensions of the core structure to be produced with different wall thicknesses and the sheet dimensions before and after bending are given in Figure 3.

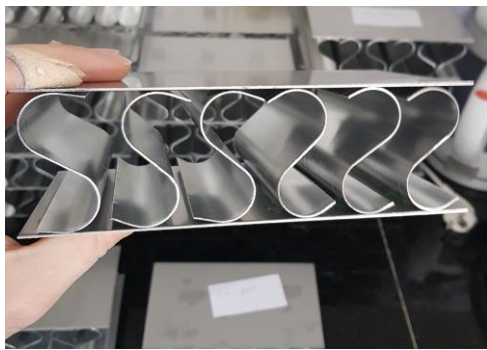




(b)



(c)



(d)

Figure 4. S-core aluminum sandwich composite panel; (a) straight row drawing view [37], (b) one straight one reverse row drawing view, (c) three straight three reverse rows drawing view [38], (d) three straight three reverse rows test specimens

Composite panel working groups are shown in Figure 4. Fig 4b, and 4c 3D views are about bending behavior of S-core sandwich panel and this paper used to same specimens dimensions data. The dimension of distance between the cores of all samples was taken as 25 mm.

Table 2. Dimensions of S-Core Sandwich Aluminum Composite Sheet Variations (Core Arrays: Straight:S, Straight-Reverse:S-R, Three Straight- Three Reverse: 3S-3R)

Core Array	Group code	Core wall thickness t, (mm)	Core Height (mm)	Core radius (mm)	Weight (gr)	Density (kg/m ³)
S	S1	0.6	50	R7.5	12.40	14.0271
	S2	0.7	50	R7.5	12.60	14.2534
	S3	0.8	50	R7.5	13.35	15.1018
	S4	0.6	50	R10	13.10	14.8190
	S5	0.7	50	R10	13.35	15.1018
	S6	0.8	50	R10	14.30	16.1764
	S7	0.6	50	R12.5	13.45	15.2149
	S8	0.7	50	R12.5	13.60	15.3846
	S9	0.8	50	R12.5	14.85	16.7986
	S10	0.7	60	R10	13.60	12.9032
S-R	S12	0.7	50	R10	14.70	12.0098
3S-3R	S13	0.7	50	R10	13.35	15.1018

Table 2 shows the dimensions of the S-core sandwich aluminum composite sheet variants. In this work, testing and analyses were done for samples with distinct core sequences in meridian wall thickness values, in addition to variable core wall thickness and radius values.

2.1. Dynamic drop test

A drop-weight impact test is performed by dropping a given weight from a predetermined height on the sample. Drop-weight tests are classified as either with or without instrumentation. The instrumented drop-weight impact test method is used to evaluate the dynamic properties of the material. Unlike earlier techniques, using different weights and changing different heights may provide the necessary energy, and the impact test system can perform the sticking, piercing, and repeated impact tests on the sample [37-38]. ACI 544.2R-89 [39] instrumented and conducted drop-weight impact tests on an Instron Ceast 9350 testing machine.



(a)

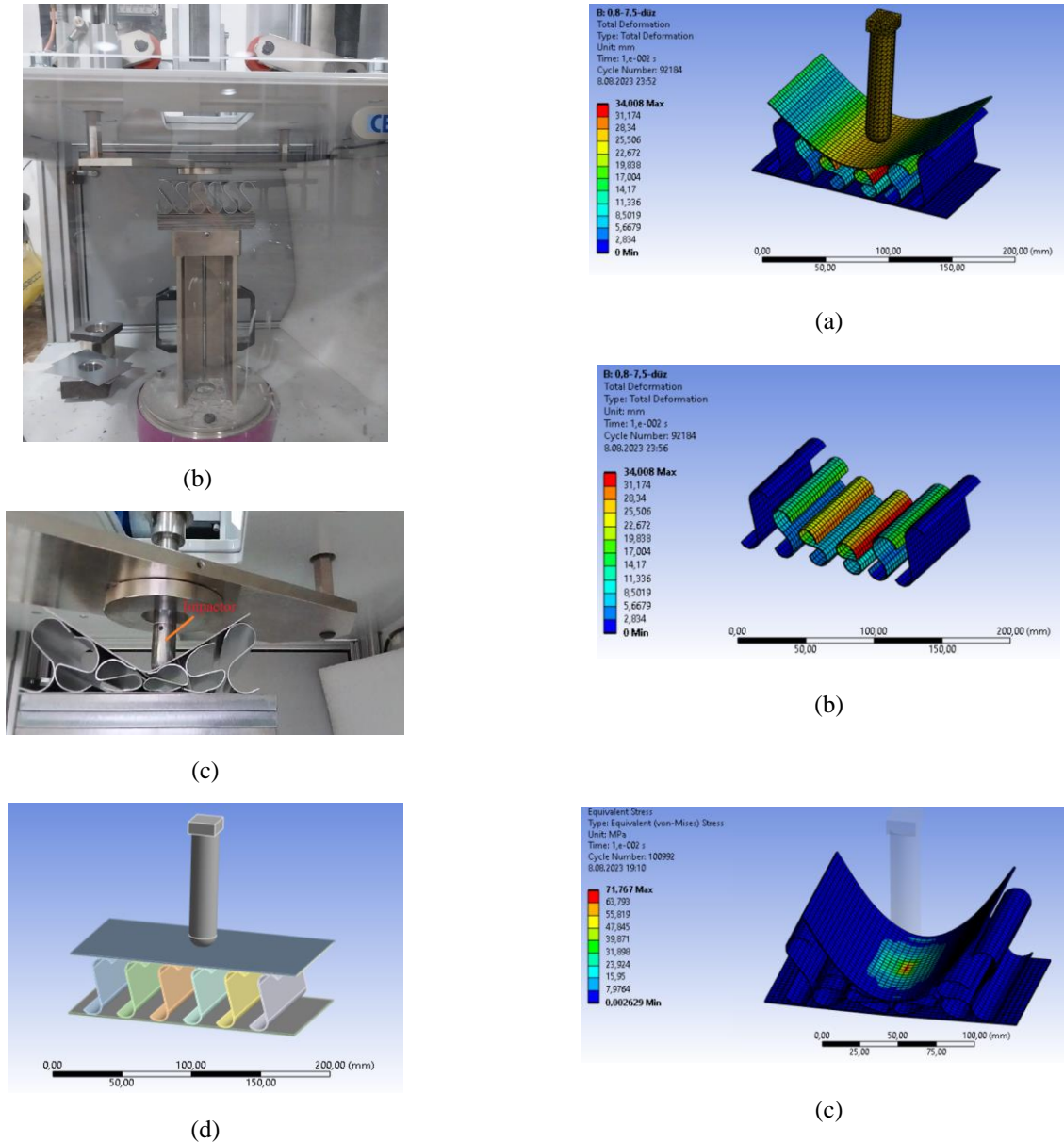


Figure 5. Instrumented drop-weight test machine. (a) Instron 9350, (b) Test setup for the composite plate, (c) Test finished for composite plate, (d) ANSYS drop-weight analysis model

Since the bottom and top layers of the composite panel have a yield strength of more than five times that of the core material, the optimum working energy value, determined by the preliminary study carried out in the Ansys software and finite element analysis data, was determined as 40 Joule. The drop-weight test apparatus is depicted in full in Figure 5. The energy of impact was 40 Joule. In each research group, the exam was repeated four times.

3. Results and Discussions

The following study results were gathered as a consequence of the drop-weight impact analysis and experimental application.

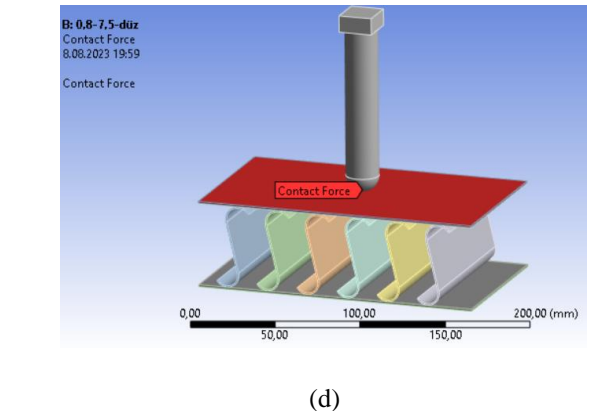
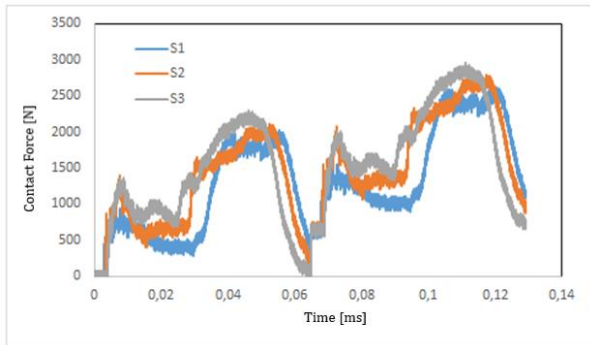


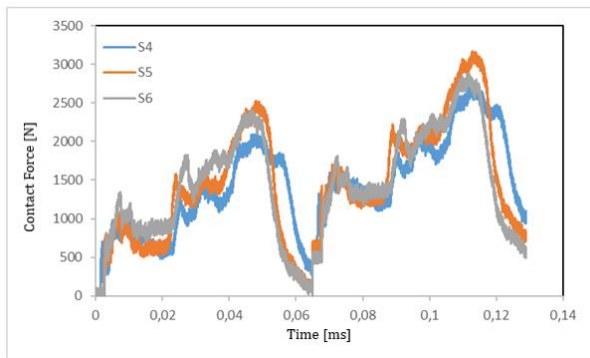
Figure 6 Total deformation a) Specimen S12, b) Specimen S3 cores, and c) Specimen S12 Equivalent stress, d) Specimen S3 contact force

The falling weight in the drop-weight impact test is 10.5 kg, and the analysis and testing were performed with 40 J energy obtained from a height of 0.388 m, the ambient

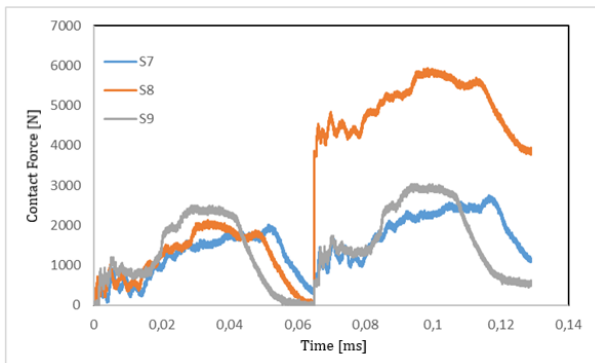
temperature was 23.8 °C, and the relative humidity was 46%. The test operations were repeated four times, and the average data were collected.



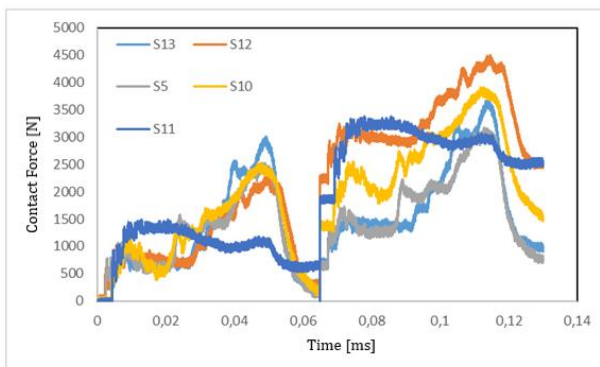
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 7 Specimens contact force- time graphs a) S1, S2, and S3 b) S4, S5, and S6 c) S7, S8, and S9 d) S5, S10, S11, S12, and S13

As seen in Figs. 7a-b-c, the contact force increased as the material wall thickness decreased. Figure 7-d depicts the change in impact force with varied core arrays and core height. While S5 and S10 reacted similarly, the alteration in the core sequence in S12 had the greatest impact value.

Table 3 shows the contact force data for the many variants in which the falling weight impact test and analysis procedure were used, as well as the proportional differences between these data.

Table 3. Contact force data for samples subjected to drop weight impact testing and analysis.

Specimens	Test	Analysis	% Difference
S1	1941.39	1625.7	-0.19419
S2	1398.65	1421.3	0.016207
S3	1363.598	1370.6	0.005109
S4	1490.71	1557.8	0.043067
S5	1548.49	13192	-0.17381
S6	1340.486	1195,6	-0.12118
S7	1560.048	1355,5	-0.1509
S8	1444.48	1355,5	-0.06564
S9	1190.26	1215,9	0.021087
S10	2472.96	2102,1	-0.17642
S11	1935.615	2105,1	0.080512
S12	2288.07	2203,8	-0.03824
S13	2530.74	2109,3	-0.1998

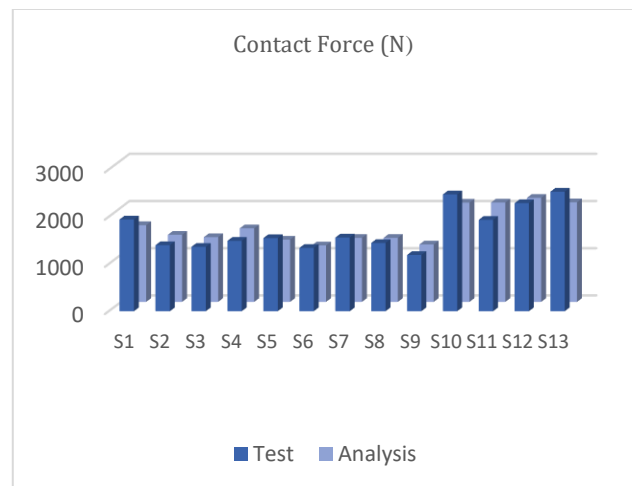
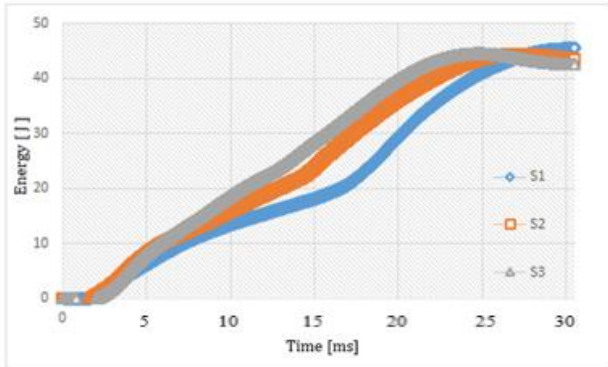


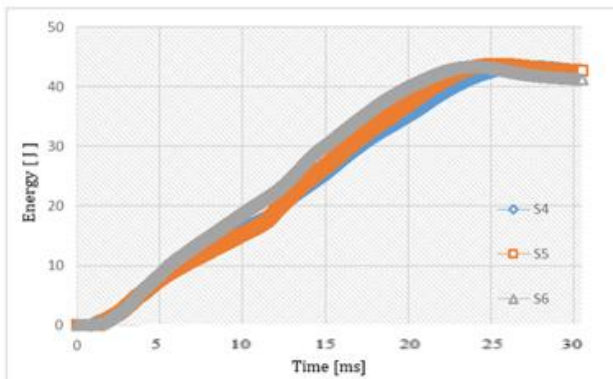
Figure 8. Contact force histogram of the studied variations

In the impact analysis and test data, damage was first observed in the core material group. The determination of the damage load formation time and the contact force as a result of the impact effect in the working groups was made

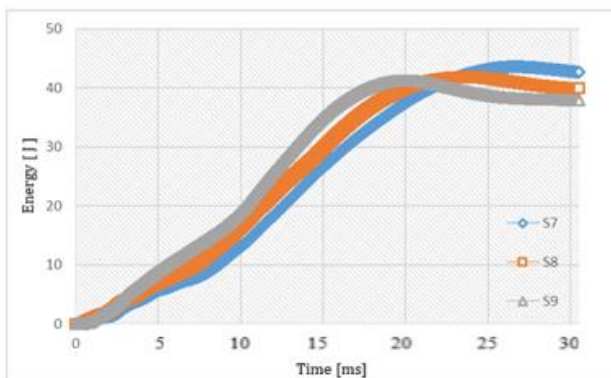
with the damage time data. Proportional differences between the study groups vary between 0.5109 and 19%. In general, the test and analysis results are compatible with each other.



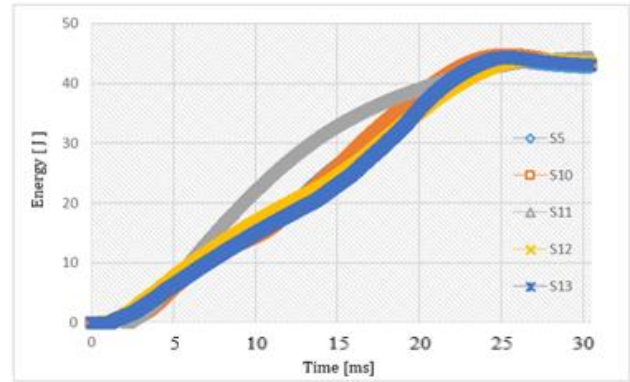
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 9. Energy time graph formed by impact test, a) S1, S2, and S3 specimens, b) S4, S5, and S6 specimens, c) S7, S8, and S9 specimens, d) S5, S10, S11, S12, and S13 specimens

As can be seen in Figure 9 a, b, and c, increasing the core wall thickness increases the energy dissipation ability. In Figure 9a, the energy dissipation of variation S3 occurred 20.1% earlier than variation S1. Figure 9d, The shortest energy dissipation ability occurred in S11, and the longest dissipation was achieved in variation S12. There is a time delay of 13.04% between these two variations. For the operating energy scale (40J), the difference in core alignment provided more efficiency than the changes in core wall thickness and core radius parameters.

4. Conclusions

When the numerical stress analysis and test results of the S-shaped sandwich panel exposed to the falling weight impact test with varied core radii, height, and wall thicknesses were analyzed, the following findings were obtained.

- When the impact loads were studied, it was discovered that as the core thicknesses grew, so did the impact loads. This is due to the fact that as the thickness of the core materials grows, so does the moment of inertia.
- The impact load-carrying ability increased when the core sequence of the examined samples was changed. (The impact load-bearing capability of the S12 sample is 47.76% more than that of the S5.)
- The energy dissipation ability was realized in close periods with each other in all research samples, with the S9 sample having the quickest damping time due to the variation in the core wall thickness.
- The impact load capacity of the S10 and S11 samples, which were generated by a change in core height compared to the S5 sample, has increased to values ranging from 59.7 to 25% due to their high moment of inertia.

The S-shaped core structure, conceived and assessed as a new core form, will contribute to the literature by utilizing

various material selections, fillers, and binding components. Its goal is to investigate the novel forms specified in future investigations.

Acknowledgment

This research was supported by Inonu University (BAP Project Code: FDK-2020-2306). The authors thank Inonu University for funding the project.

Contributions of the authors

Corresponding author contributions this paper

-Working concept and design

-Data collecting

-Analysis and interpretation of data

Second author contributions this paper

-Revision

Conflict of Interest Statement

There is no conflict of interest between the authors.

Statement of Research and Publication Ethics

The study is complied with research and publication ethics.

References

- [1] M.Ş. Adin, E. Kılıçkap, "Strength of double-reinforced adhesive joints," *Materials Testing*, Feb 23, 2021. DOI: [10.1515/mt-2020-0024](https://doi.org/10.1515/mt-2020-0024)
- [2] H. Adin , B. Yıldız, M.Ş. Adin , "NUMERICAL INVESTIGATION OF FATIGUE BEHAVIOURS OF NON-PATCHED AND PATCHED ALUMINIUM PIPES, " *European Journal of Technique (EJT)*, Volume: 11 Issue: 1, 60 – 65, 2021, DOI: [10.36222/ejt.893327](https://doi.org/10.36222/ejt.893327)
- [3] M. Arslan , O. Güler, U. Alver, " The investigation of the mechanical properties of sandwich panel composites with different surface and core materials". *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 24(6),1062-1068, 2018
- [4] S. Chen, X. Tan, J. Hu, S. Zhu, B. Wang, L. Wang, Y. Jin, L. Wu, "A novel gradient negative stiffness honeycomb for recoverable energy absorption," *Composites Part B: Engineering* ,Volume 2, 108745, 2021
- [5] J. Cao, K. Cai, Q. Wang, J. Shi, "Damage behavior of a bonded sandwich beam with corrugated core under 3-point bending, *Material Design* Volume, " 95, 165-172, 2016
- [6] Y.Zhang, T. Liu, W. Tizani, "Experimental and numerical analysis of dynamic compressive response of Nomex honeycombs," *Composite Part B:Engineering*, Volume 148, 27-39, 2018
- [7] X. Wu , H. Yu, L. Guo, L. Zhang, X. Sun, Z. Chai, "Experimental and numerical investigation of static and fatigue behaviors of composites honeycomb sandwich structure," *Composite Structure*, 165-172, 2019
- [8] G. Xu, F. Yang, T. Zeng, S. Cheng, Z. Wang, "Bending behavior of graded corrugated truss core composite sandwich beams," *Composite Structure*, 342-251, 2016
- [9] T. Li, L. Wang, "Bending behavior of sandwich composite structures with tunable 3D-printed core materials," *Composite Structure*, 46-57, 2017
- [10] F.C. Potes, J.M. Silva, P.V. Gamboa, "Development and characterization of a natural lightweight composite solution for aircraft structural applications," *Composite Structures*, 430-440, 2016
- [11] J. Forsberg, L. Nilsson, "Evaluation of response surface methodologies used in crashworthiness optimization," *International Journal of Impact Engineering*, 759-777, 2006
- [12] G. Qi, Y.L. Chen, P. Richert , L. Ma , K.U. Schröder, "A hybrid joining insert for sandwich panels with pyramidal lattice truss cores," *Composite Structures*, 241, 112-123, 2020
- [13] X. Lu, V.B.C Tan, T.E. Tay, "Auxeticity of monoclinic tetrachiral honeycombs," *Composite Structures*, Volume 241, 112067
- [14] K. Naresh, W.J. Cantwell, "Single and multi-layer core designs for Pseudo-Ductile failure in honeycomb sandwich structures," *Composite Structures*, Volume 256, 113059, 2021
- [15] S. Newstead, L. Watson, M. Cameron., "Vehicle Safety Ratings Estimated From Police Reported Crash Data: 2008 Update," *Monash University Accident Research Center Report*, Melbourne, Australia, 280, 2008
- [16] X.M. Xiang, G. Lu., Z.H. Wang, "Quasi-static bending behavior of sandwich beams with thin-walled tubes as core," *Int J Mech Sci*, 55-62, 2015
- [17] A. Petras, M.P.F. Sutcliffe, "Failure mode maps for honeycomb sandwich panels," *Composite Structure*, 237-252, 1999

- [18] Z. Sun, S. Shi, X. Hu, X. Guo, J. Chen, "Short-aramid-fiber toughening of epoxy adhesive joint between carbon fiber composites and metal substrates with different surface morphology," *Composite Part B Engineering*, 38-45, 2015
- [19] H. Adin, M.Ş. Adin, "Effect of particles on tensile and bending properties of jute epoxy composites," *Materials Testing*, March 16, 2022. DOI: [10.1515/mt-2021-2038](https://doi.org/10.1515/mt-2021-2038)
- [20] H.B. Rachid, D. Nouredine, B. Benali, M.Ş. Adin, M.Ş., "Effect of nanocomposites rate on the crack propagation in the adhesive of single lap joint subjected to tension," *MECHANICS OF ADVANCED MATERIALS AND STRUCTURES*; JUL 22 2023, DOI: [10.1080/15376494.2023.2240319](https://doi.org/10.1080/15376494.2023.2240319)
- [21] S.D. Pan, L.Z. Wu, Y.G. Sun, Z.G. Zhaou, "Fracture test for double cantilever beam of honeycomb sandwich panels," *Materials Letters*, 62, 523-526, 2008
- [22] Q. Qin, S. Chen, K. Li, M. Jiang, T. Cui, J. Zhang, "Structural impact damage of metal honeycomb sandwich plates," *composite*, Volume 252, 112719, 2020
- [23] Q.H. Qin, T.J. Wang, "Low-velocity impact response of fully clamped metal foam core sandwich beam incorporating local denting effect," *Composite Structures*, Volume 96, 346-356, 2013
- [24] X. Zhang, F. Xu, Y. Zang, W. Feng, "Experimental and numerical investigation on damage behavior of honeycomb sandwich panel subjected to low-velocity impact," *composite structure*, Volume 236, 111882, 2020
- [25] J. Xiong, L. Ma, L. Wu, B. Wang, and A. Vaziri, "Fabrication and crushing behavior of low-density carbon fiber composite pyramidal truss structures," *Composite Structures*, Volume 92, 2695-2702, 2010
- [26] H.P. Wang, C.T. Wu, Y. Guo, E. Mark, A. Botkin, "Coupled meshfree/finite element method for automotive crashworthiness simulations," *International Journal of Impact Engineering*, 36(10-11), 1210-1222
- [27] J. Mei, J. Liu, W. Huang, "Three-point bending behaviors of the foam-filled CFRP X-core sandwich panel: Experimental investigation and analytical modelling," *Composite Structures*, Volume 284, 11520, 2022
- [28] V.S. Sokolinsky, H. Shen, "Vaikhanski L and Nutt SR., Experimental and analytical study of nonlinear bending response of sandwich beams," *Composite Structures*, 60, 219-229, 2003
- [29] A. Boukar, S. Corn, P. Slangen, P. Ieny, "Finite element modelling of low velocity impact test applied to biaxial glass fiber reinforced laminate composites," *International Journal of Impact Engineering* 165, 104218, 2022
- [30] G. Belingardi, R. Vadori, "Low velocity impact tests of laminate glass-fiber-epoxy matrix composite material plates," *International Journal of Impact Engineering* 27, 213-229, 2002
- [31] H. Yujia, M. Ming, Y. Siya, W. Kai, "Drop-weight impact behaviour of stitched composites: Influence of stitching pattern and stitching space," *Composites: Part A* 172, 107612, 2023
- [32] D. Lee, B. Park, S. Park, C. Choi, J. Song, "Fabrication of high-stiffness fiber-metal laminates and study of their behavior under low-velocity impact loadings," *Composite Structures*, 189, 61-69, 2018
- [33] H. Liu, Y. Zhou, L. Chen, X. Pan, S. Zhu, T. Liu, W. Li, "Drop-weight impact responses and energy absorption of lightweight glass fiber reinforced polypropylene composite hierarchical cylindrical structures," *Thin-Walled Structures* 184, 110468, 2023
- [34] Aluminum 1050-O. <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=273c1ffbdc134a8292c704da3ee2ff35>. Access date 18 August 2023
- [35] Stainless steel-Grade316. <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=863>. Access date 18 August 2023
- [36] Stainless steel 316. <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=3a413dabd215462da3408e6e8b761349>. Access date 18 August 2023
- [37] H.M. Öztemiz, Ş. Temiz, "Mechanical Behaviors Of Different Radii Of Curvature S-Shaped Core Sandwich Composites Subjected To Bending Load," *International Asian Congress On Contemporary Sciences-VI*, Van-Türkiye, 200-207, 27-29 May 2022
- [38] H.M. Öztemiz, Ş. Temiz, "Mechanical Behaviors Of Different Array With S-Shaped Core Sandwich Composites Subjected To Bending Load," *International Asian Congress On Contemporary Sciences-VI*, Van-Türkiye, 208-216, 27-29 May 2022

- [39] E.A. Alwesabi, B.H. Abu Bakar, I.M.H. Alshaikh, H.M. Akil, "Impact resistance of plain and rubberized concrete containing steel and polypropylene hybrid fiber," *Mater Today Commun*, DOI: 10.1016/j.mtcomm.2020.101640
- [40] M. Sahan M, I. Unsal, "An Experimental Analysis for Impact Behaviour of Portland Cement Concrete Substituted with Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate, Iranian Journal of Science and Technology," *Transactions of Civil Engineering*, 47:2113–2130, 2023 DOI: 10.1007/s40996-023-01052-7
- [41] ACI 544.2R-89 (1999) Measurement of properties of fiber reinforced concrete. ACI Committee 544



Pt-Al/Grafen-KNT Nanoyapılarının Mekanik Performansı; Bir Moleküler Dinamik Simülasyonu

Mechanical Performance of Pt-Al/Graphene-CNT Nanostructures; A Molecular Dynamics Simulation

Ünal Değirmenci^{1*}

¹ Bingöl Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, udegirmenci@bingol.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1480-2488>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 04 Kasım 2023
Revizyon 26 Kasım 2023
Kabul 27 Kasım 2023
Online 29 Mart 2024

Anahtar Kelimeler:

*Metal-Karbon nanokompozit:
Mekanik davranış: Deformasyon
özellikleri: Moleküler Dinamik.*

ÖZ

Metallerle karbon temelli yapıların bir araya getirilmesi ile oluşturulan hibrit nanokompozitler, malzeme bilimi ve mühendisliğinde heyecan verici bir araştırma alanı oluşturmuştur. Bu kompozitler, metallerin dayanıklılığı ile karbon bazlı yapıların hafiflik ve yüksek mukavemeti arasında bir denge sağlayarak benzersiz mekanik özelliklere sahip olurlar. Bu nedenle yeni Metal –Karbon nanoyapılarına eğilim halen devam etmektedir. Bu çalışmada, Platin ve alüminyum plakalar arasına yerleştirilen kovalent bağlı grafen-karbon nanotüp (KNT) yapılarından oluşan yeni bir Metal-Karbon nanoyapısı sunulmaktadır. Ayrıca, yapının mekanik özelliklerini ve alta yatan deformasyon mekanizmalarını araştırmak için, farklı çaplara sahip KNT (örn. KNT(6x6), KNT(8x8), KNT(10x10), KNT(12x12)) içeren numunelerin çekme ve basınç deneyleri gerçekleştirilir. Sonuçlara göre, G-KNT yapılarının Pt-Al yapısının çekme davranışını her iki doğrultuda (KNT ve Grafen) artırdığı görülmüştür. KNT doğrultusunda çekme yüklemeleri için KNT çapı azaldıkça hibrit yapıların elastik modülü ve maksimum gerilme değerleri artarken grafen doğrultusunda ise maksimum gerilme değerleri ve süneklikleri artmaktadır. Basma dayanımı açısından ise lineer bölgede genel olarak KNT çapı arttıkça dayanımın arttığı yoğunlaşma bölgesinde ise daha küçük çaplı KNT içeren yapıların daha iyi basma dayanımı sergilediği görülmüştür. Bu çalışma ile Pt-Al yapısına kıyasla daha hafif ve daha yüksek çekme dayanımına sahip bir nanoyapı sunulmuştur.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 04 November 2023
Received in revised form 26 November 2023
Accepted 27 November 2023
Available online 29 March 2024

Keywords:

*Metal-Carbon nanocomposite:
Mechanical behavior: Deformation
properties: Molecular Dynamics.*

Doi: 10.24012/dumf.1386136

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

Hybrid nanocomposites, created by combining metals and carbon-based structures, have created an exciting field of research in materials science and engineering. These nanocomposites have unique mechanical properties, providing a balance between the durability of metals and the lightness and high strength of carbon-based structures. Therefore, the trend towards new metal-carbon nanostructures is still ongoing. In this study, a new metal-carbon nanostructure consisting of covalently bonded graphene-carbon nanotube (CNT) structures placed between platinum and aluminum plates is presented. Additionally, to investigate the mechanical properties and deformation mechanisms of the structure, tensile and compression tests are carried out on samples containing CNTs with different diameters (e.g. CNT(6x6), CNT(8x8), CNT(10x10), CNT(12x12)). According to the results, it was observed that G-CNT structures increased the tensile behavior of the Pt-Al structure in both directions (CNT and Graphene). As the CNT diameter decreases for tensile loading in the CNT direction, the elastic modulus and maximum stress values of the hybrid structures increase, while in the graphene direction, the maximum stress values and ductility increase. In terms of compressive strength, it has been observed that in the linear region, as the CNT diameter increases, the strength generally increases, and in the densification region, structures containing smaller diameter CNTs exhibit better compressive strength. With this study, a nanostructure that is lighter and has higher tensile strength compared to the Pt-Al structure has been presented.

Giriş

Farklı malzeme bileşenlerinin birleştirilmesiyle oluşturulan hibrit kompozitler, üstün mekanik özelliklere sahip olmaları nedeni ile son yıllarda, malzeme bilimi ve mühendisliği alanında yeni nesil malzemeler olarak büyük önem kazanmaktadır[1, 2]. Özellikle metallerle karbon bazlı yapıların bir araya getirildiği hibrit kompozitler, hem metalin dayanıklılığından hem de karbonun hafifliği ve yüksek mukavemetinden faydalanarak benzersiz özellikler sunmaktadır[3-6]. Grafen, fulleren ve Karbon nanotüp (KNT) gibi karbon içerikli yapılar düşük yoğunluk, yüksek gerilme direnci, yüksek elastik modül ve iyi sünekliğe sahiptirler[7, 8]. Bu nedenle araştırmacılar tarafından gerek birbirleri ile[9, 10] gerekse de metal [11, 12] ve polimer[13-15] gibi diğer yapısal malzemelerle bir araya getirilerek hibrit kompozit formları oluşturulmaya çalışılmıştır.

Hibrit yapılarda, yapıların kararlılığını, mekanik performansını, termal ve elektriksel iletimini artırmak için, farklı karbon yapıların kendileri arasında kovalent bağ oluşturması ile güçlü bir uyumun sağlanması özellikle önemlidir[16-18]. Kovalent bağlı hibrit karbon yapıları örnek olarak KNT-grafen, grafen-fulleren ve grafen-KNT-fulleren hibrit yapıları örnek verilebilir. Bu yapıların bir araya getirilmesi ile yapıların mekanik, termal ve elektronik olarak pek çok özelliği iyileştirilmektedir. Ayrıca, Kemik yaralanmaları sonucu hasarlı kemik dokuları için alternatif süngerimsi kemik doku malzemeleri geliştirmek amacı ile karbon bazlı nano gözenekli köpükler üzerinde çalışılmaktadır [19]. Çelebi vd. [20] rastgele KNT ağların birleşiminden oluşan bir yapı sunup bu yapının mekanik özelliklerini moleküler dinamik (MD) simülasyonları kullanarak incelemişlerdir. Çapraz bağlı KNT'ler arasında kovalent bağ oluşumu ile daha yüksek young modüle sahip bir yapının elde edilebileceği gösterilmiştir. Fan ve ark. [21], kimyasal buhar biriktirme (CVD) tekniği kullanarak 3D grafen/KNT sandviç yapısı elde etmiş ve termal ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Benzer şekilde, Xu ve ark. [22] da karbon nanotüpler ve grafen levhalar tarafından inşa edilen yapının mekanik ve termal performansını araştırdı. Dimitrakakis ve ark. [23], ise grafen tabakaları arasına dikey olarak yerleştirilmiş KNT'lerden oluşan yeni bir 3D ağ yapısının hidrojen depolama performansını inceledi. Grafen ve KNT yapılarının yanı sıra Grafen-fulleren hibrit yapıları da çalışılmaktadır. Bu kapsamda, Değirmenci et al.[9] grafen birimleri üzerine farklı boyutlarda fullerenlerin bağ yapması ile elde edilen çok sayıda GNR-F (grafen-fulleren) birimlerin rasgele konumlandırılarak birbiri arasında bağ oluşturulması ile yeni bir hibrit yapı modellemiştir ayrıca, bu yapıların mekanik özelliklerini MD simülasyonları ile araştırarak fulleren boyutlarının etkilerini incelemişlerdir. Önerdikleri GNR-F ağ nanoyapılarının, çekme yükünde sünek bir yapıya sahip olduğunu, sıkıştırma tepkisinin ise kayda değer enerji emme kapasitesine sahip köpük benzeri bir davranış sergilediğini göstermişlerdir. Bir başka çalışmada Kırcı [24] ise paralel grafenler arasına kovalent olarak bağlanmış fulleren birimlerinden oluşan yeni bir karbon bazlı hibrit malzeme önermiş ve MD simülasyonları kullanarak termodinamik kararlılıklarını incelemiştir. Ayrıca, sandviç yapı malzeme sisteminin mekanik özelliklerini sıkıştırma testleri gerçekleştirilerek incelenmiştir. Fulleren boyutunun

sıkıştırma tepkisi üzerindeki etkisini araştırmış ve daha büyük fullerenlere sahip numunelerin daha yüksek enerji emme kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir. Bunların yanı sıra bu yapıların üçlü hibrit formları da çalışılmaktadır. Örneğin, Değirmenci vd.[25] grafen nanoribbonların KNT birimleri etrafında farklı geometrik desenlerde düzenlenmesiyle yeni bir hibrit gözenekli grafen-karbon nanotüp (G-CNT) hibrit yapıların tasarımı ile termal ve mekanik analizini sunmuşlardır. Ayrıca dolgu birimi olarak fullerenler kullanarak yapıların basınç dayanımı ve enerji soğurma kapasitesini artırmayı amaçlamışlardır. Yapılar dikkate değer termal ve mekanik özelliklere sahiptir.

Karbon temelli yapıların kendi arasında oluşturduğu hibrit yapıların yanı sıra metallerle yapmış olduğu hibrit nano kompozitler de gelişmiş özellikler gösterdiği için büyük ilgi görmektedir. Metal malzemeler içerisinde özellikle alüminyum, hafif ve iyi mekanik özellik göstermesinden dolayı temel kompozit malzeme olarak seçilmektedir. Örneğin, Pal vd.[26] moleküler dinamik simülasyonları kullanarak farklı sıcaklıklar (10 K, 300 K ve 681°C) altında nanokristal (NC) Alüminyum-KNT yapılarının mekanik özelliklerini araştırmışlardır. NC-Al numunesine göre KNT gömülü NC-Al numunelerinde hem mukavemette hem de süneklikte bir artış olduğunu görmüşlerdir. Bir diğer çalışmada, Park vd. [27] MD simülasyonları ile KNT'ler ile güçlendirilmiş Al kompozitlerin gerilme davranışlarını karakterize etmişlerdir. KNT'lerin konfigürasyonlarına bağlı olarak Al'un elastik modülü gibi mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiş ve KNT katkısının artış sağladığı görülmüştür. KNT'lerin yanı sıra grafenlerin alüminyuma katılması ile elde edilen kompozitler üzerine de çalışmalar yapılmıştır. Wang ve ark. [11], grafen-alüminyum kompozitlerin çekme dayanımını incelemiş ve çekme dayanımının, saf alüminyuma göre %62 daha fazla olduğunu belirlemiştir. Shin ve ark.[28] ise birkaç katmanlı grafen ve KNT'leri takviye malzemesi olarak kullanarak alüminyum kompozit yapısının gerilme dayanımını artırmaya çalışmıştır. Bu alanda fulleren-alüminyum kompozitlerin de araştırıldığını görmekteyiz [29, 30]. Ertürk vd. [31] alüminyum bloklar arasına yerleştirilmiş kovalent olarak bağlanmış fulleren-grafen sandviç yapısından oluşan bir yapı oluşturup çekme ve basma gibi mekanik özelliklerini MD simülasyonları ile farklı fulleren boyutu ve yükleme hızlarında incelemiştir. Sonuç olarak, hem çekme hem de basma yüklemeleri için, fullerenlerin boyutu arttıkça hibrit yapının yükleme hızına çok daha duyarlı hale geldiği bulunmuşlardır.

Karbon temelli hibrit yapıların yapısal kararlılığı ve özellikleri üzerine yukarıda belirtilen pek çok çalışmanın yanı sıra karbon metal kompozit yapılarında çalışıldığı görülmektedir. Fakat hala bu alandaki çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu nedenle, bu çalışmada platin ve alüminyum plakalar arasına yerleştirilen kovalent bağlı Grafen-KNT yapılarının MD simülasyonları ile modellenmesi ve mekanik özelliklerinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu yeni karbon-metal hibrit nanoyapısı Pt-Al-GKNT (Platin-Alüminyum-Grafen-KNT) olarak adlandırılır. Ayrıca bu çalışmada, Al ve grafen boyutları sabit tutularak KNT çapları ve sayılarının mekanik performans üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla, farklı modeller oluşturulmuştur. Bu yapıların deformasyon özellikleri ve mekanik davranışlarını

incelemek için simülasyonlar sıkıştırma ve çekme yüklemesi altında gerçekleştirilmiştir. KNT etkisinin yanı sıra önerilen yapının mekanik özellikleri Pt-Al yapısındaki ile kıyaslanarak mekanik özelliklerdeki gelişme ortaya koyulmaya çalışılmıştır.

Modelleme ve simülasyon detayları

Atomistik modelleme

Bu çalışmada önerilen Pt-Al-GKNT hibrit yapıları platin ve alüminyum plakalar arasında grafen levhalara kovalent olarak bağlanmış KNT'ler içeren sandviç yapılı bir kompozit yapıdan oluşmaktadır. Pt-Al-GKNT yapılarına ait örnekler Şekil 1'de gösterilmektedir. Önerilen hibrit yapının atomistik modelleme süreci dört ana aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada grafenlerin (GNR'ler) ve karbon nanotüplerin (KNT) atomistik koordinatları ayrı ayrı üretilir. Bu aşamada 20x20 nm boyutlarında tek katmanlı 2 adet grafen ve farklı çaplarda 10nm boyundaki KNT yapılarının Visual Molecular Dynamics (VMD) [32] yazılımı kullanılarak atomik koordinatları elde edilmiştir. İkinci adımda, grafen levhalar arasında dikey olarak belirli sayılarda KNT yerleştirilerek ısı kaynak işlemi yardımı ile kovalent bağ oluşturularak G-KNT yapıları oluşturulmuştur. Bir sonraki aşamada, grafen levhaların hem üst hem de alt serbest yüzeylerine 2.5nm kalınlığında referans [33]'de verildiği üzere alüminyum ve karbon atomları arasındaki bağ uzunluğu 0.024nm olacak şekilde mesafe bırakılarak iki alüminyum levha oluşturulur. Böylece Al-G-KNT yapıların atomik modeli oluşturulmuştur.

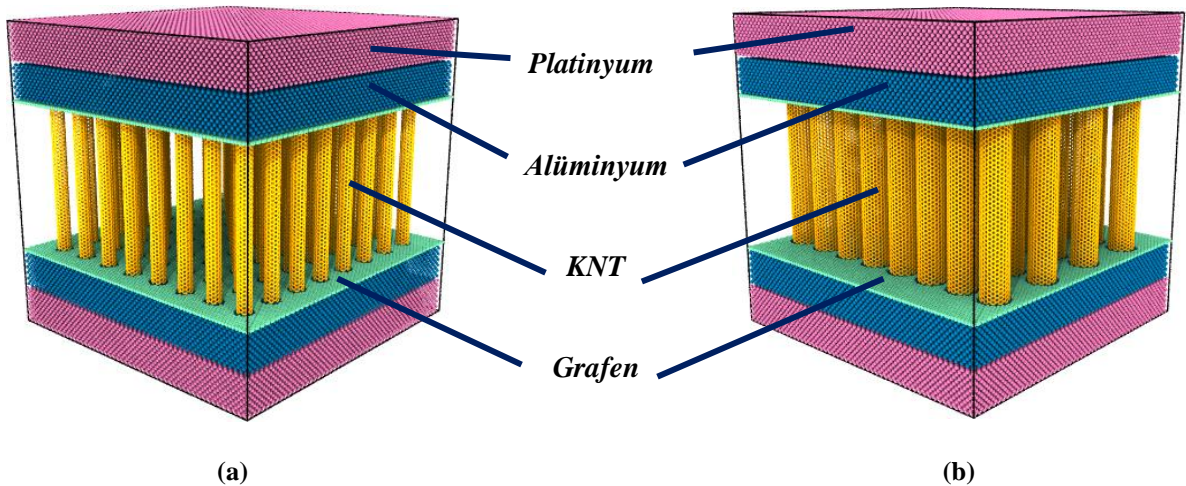
Pt-Al-GKNT yapıları ise Al-G-KNT modellerinde Al levhalarının oluşturulmasına benzer şekilde Al levhaların her iki yüzeyine 2.5 nm kalınlıklarında Pt levhası oluşturularak elde edilmiştir. Son aşamada ise yapı oda sıcaklığında (300 K) minimize edilerek dengelenir ve kararlılığı incelenir. Hibrit nanoyapılara ait örnek resimler Şekil 1'de gösterilmektedir. Bu çalışmada, farklı KNT boyutlarının etkisini görebilmek için uzunlukları eşit olan dört farklı KNT tipi (KNT6x6, KNT8x8, KNT10x10 ve KNT12x12) kullanılarak aynı atomik yoğunluğa sahip dört farklı Pt-Al-GKNT yapısı üretilmiştir. Bu amaçla, yaklaşık olarak eşit atom yoğunluğunu sağlayabilmek için Grafen'lerin boyutları ve KNT'lerin sayısı küçük çaplı KNT'lerden çok sayıda büyük çaplı KNT'lerden ise daha az sayıda olacak şekilde düzenlenmiştir. Yapılarda kullanılan karbon nanotüplere ait çap değerleri ve atom sayıları Tablo 1'de verilmiştir.

KNT ve grafen levhalar arasında oluşturulan kovalent bağ, tavlama işlemi olan ısı kaynak yöntemi [9, 34] kullanılarak gerçekleştirilir. Bu tavlama işlemi grafen levhalar ile KNT sınırındaki bağlantı bölgelerine yüksek sıcaklıklar uygulanması ile gerçekleştirilir. Grafen ve KNT arasında oluşturulan bağlar ve bağlantı bölgeleri örneği Şekil 2'de gösterilmektedir.

Analiz esnasında ısı kaynak işlemi daha düşük sıcaklık ve zaman aralığında gerçekleştirerek hızlandırmak için, KNT'lerin grafen levha ile kesiştiği dairesel bölgelerde grafenlerden atomlar çıkarılarak deformasyonlar oluşturulur. Bu sayede oluşturulan sarkık bağlarla daha kolay yeni bağlar oluşturabilmek mümkündür.

Tablo 1. Modellere göre kullanılan KNT'lere ait çap değerleri ve atom sayıları

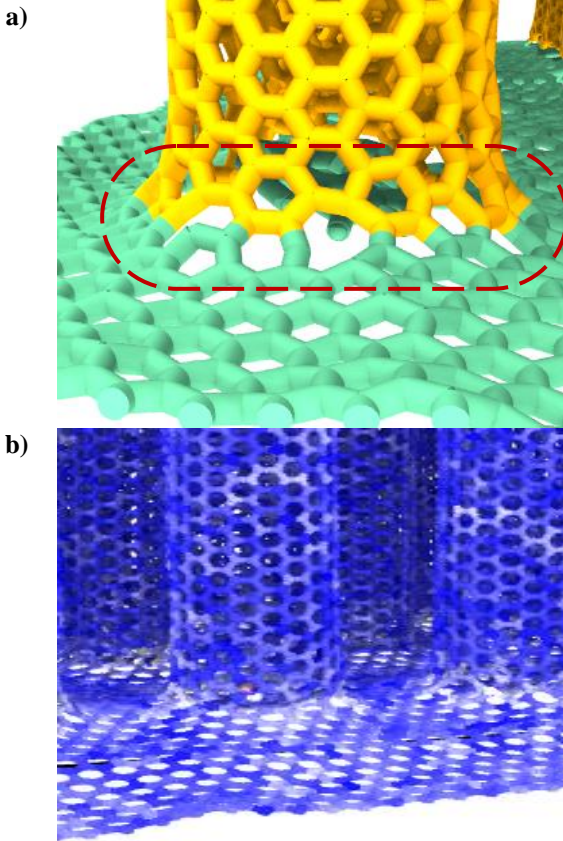
Modeller	Grafen boyutu (nm)	KNT Çapı (nm)	Doğrultuya göre KNT Sayısı		KNT sayıları	KNT Atom sayıları
			X	Y		
Pt-Al-GKNT6x6	20x20	0.816	8	8	64	62976
Pt-Al-GKNT8x8	20x20	1.086	8	6	48	62976
Pt-Al-GKNT10x10	20x20	1.356	8	5	40	65600
Pt-Al-GKNT12x12	20x20	1.626	8	4	32	62976



Şekil 1. Temsili Pt-Al-GKNT yapıları (a) Pt-Al-GKNT(6x6), (b) Pt-Al-GKNT(12x12).

Simülasyon Detayları

Termal kaynak ve mekanik testlerin MD simülasyonları için, Sandia National Laboratories tarafından geliştirilen bir açık kaynak kodu olan Büyük Ölçekli Atomik/Moleküler Büyük Paralel Simülatör (LAMMPS), kullanılır[35]. Atomlar arasındaki etkileşimi sağlamak için interatomik potansiyeller kullanılır. Metal atomları (Pt-Pt, Al-Al ve Pt-Al) arasındaki kuvvet hesaplamaları için uygun bir potansiyel dosyasına sahip Gömülü Atom Yöntemi (EAM) kullanılır. Karbon atomları (Grafen ve KNT) arasındaki etkileşim için ise Uyarlanabilir Moleküler Reaktif Ampirik Sınır Serisi (AIREBO), potansiyeli kullanılır. AIREBO potansiyeli Brenner vd. tarafından geliştirilen REBO potansiyeline burulma ve LJ etkileşimlerinin eklenmesi ile elde edilen bir potansiyeldir[34, 36]. Ayrıca, AIREBO potansiyeli analiz esnasında yapıda oluşan ve kopan bağları simule edebildiği için dinamik bir sistem topolojisini iyi bir şekilde temsil etmektedir[37]. Bu nedenle yeni bağların oluşumunu doğru bir şekilde tahmin edebildiği için tercih edilmiştir. Karbon ve Platin atomları arasındaki hibrit etkileşimler için Lennard jones potansiyeli [38] kullanılırken karbon ve alüminyum atomları arasındaki hibrit etkileşimler için Mors potansiyeli kullanılır [39]. Termal kaynak prosedüründe sistemin termal dengesini sağlamak için Nosé-Hoover termostat ve kanonik topluluk (NVT) sistemi, termodinamik özellikler olarak tanımlanır.



Şekil 2. KNT(10x10) ve grafen tabakaları arasında oluşturulan kovalent bağlar, a) ilk model bağ görünümü, b) deformasyon anındaki bağ görünümü.

Grafen tabakaları ile KNT'ler arasında kovalent bağları oluşturmak için grafen ve ona karşılık gelen KNT bölgesine termal kaynak işlemi uygulanır.

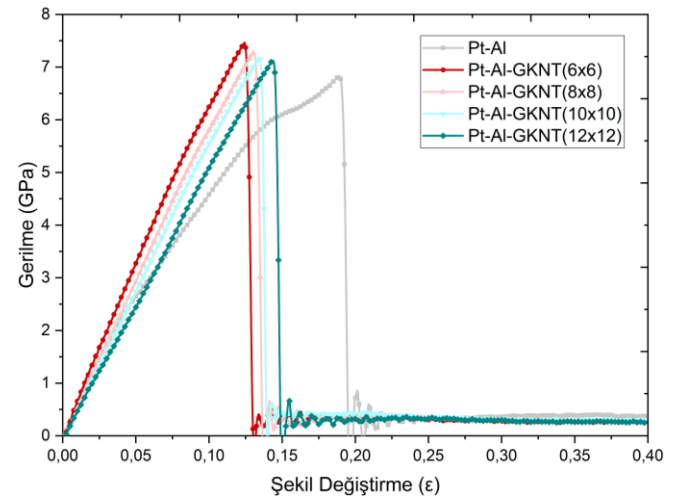
Isıl kaynak işleminde ilk olarak termal gevşemeyi gerçekleştirmek için ortam oda sıcaklığında (300K) 40 pikosaniye (ps) tutulur. Ardından füzyondaki atomların sıcaklığı kademeli olarak (her kademe için 300K) referans sıcaklığa (1200 K) yükseltilir. Kaynak bölgesindeki atomlara kovalent bağ oluşumu için enerji sağlamak üzere 50 ps süreyle bu sıcaklıkta sabit tutulur. Daha sonra, sıcaklığı 30 ps içinde 1200 K'den 300 K'ye düşürmek için aşamalı soğutma yapılır. Son olarak, 300 K'de 40 ps için rahatlatılır. Böylece bağlantı bölgelerindeki bağların stabilitesi incelenir [18]. Isıl kaynak işlemi sonunda KNT'ler ve grafenler arasında oluşan bağlar Şekil 2'de gösterilmektedir.

Atomik modeller oluşturulduktan sonra serbest enerji profilleri izlenerek numunelerin termodinamik stabilitesini incelemek için atomistik modeller, Nose-Hoover termostatı ve izotermal-izobarik (NPT) topluluğu kullanılarak 100 ps boyunca oda sıcaklığı şartlarında termalize edilir. Bu aşamada atom başına düşen toplam enerji değerleri zamana bağlı olarak izlenir. Numunelerin termodinamik uygulanabilirliği sağlandıktan sonra mekanik testlere geçilir. Mekanik testlerde çekme ve basma yükleri numunelerin sıcaklığı NVT entegrasyonu ile 0.001 ps^{-1} yükleme hızında oda sıcaklığı şartlarında sabit tutularak uygulanır. Analizler sonucunda her iki yükleme durumu için Young modülü (E), akma gerilimi (σ_y) ve nihai gerilim (σ_u) değerleri hesaplanarak mekanik özellikleri karşılaştırılır. Ayrıca mekanik analizler KNT'lerin enine (Y) ve boyuna (Z) doğrultuları için ayrı ayrı gerçekleştirilerek doğrultu etkileri de incelenmiştir.

Sonuçlar ve tartışma

Çekme Davranışı

Bu çalışmada ilk olarak nanoyapıların termodinamik olarak kararlı olduklarını incelemek için 300 K'de enerji profilleri yeterince uzun bir süre incelenmiştir. Önerilen yapıların enerji değerlerinin hemen hemen sabit kaldığı görülmektedir. Ayrıca, önerilen ilk tasarıma kıyasla belirgin bir yapısal değişiklik olmaması, termodinamik olarak kararlı olduğunu göstermektedir. Yapıların kararlı olduğu anlaşıldıktan sonra mekanik testler gerçekleştirilmiştir.



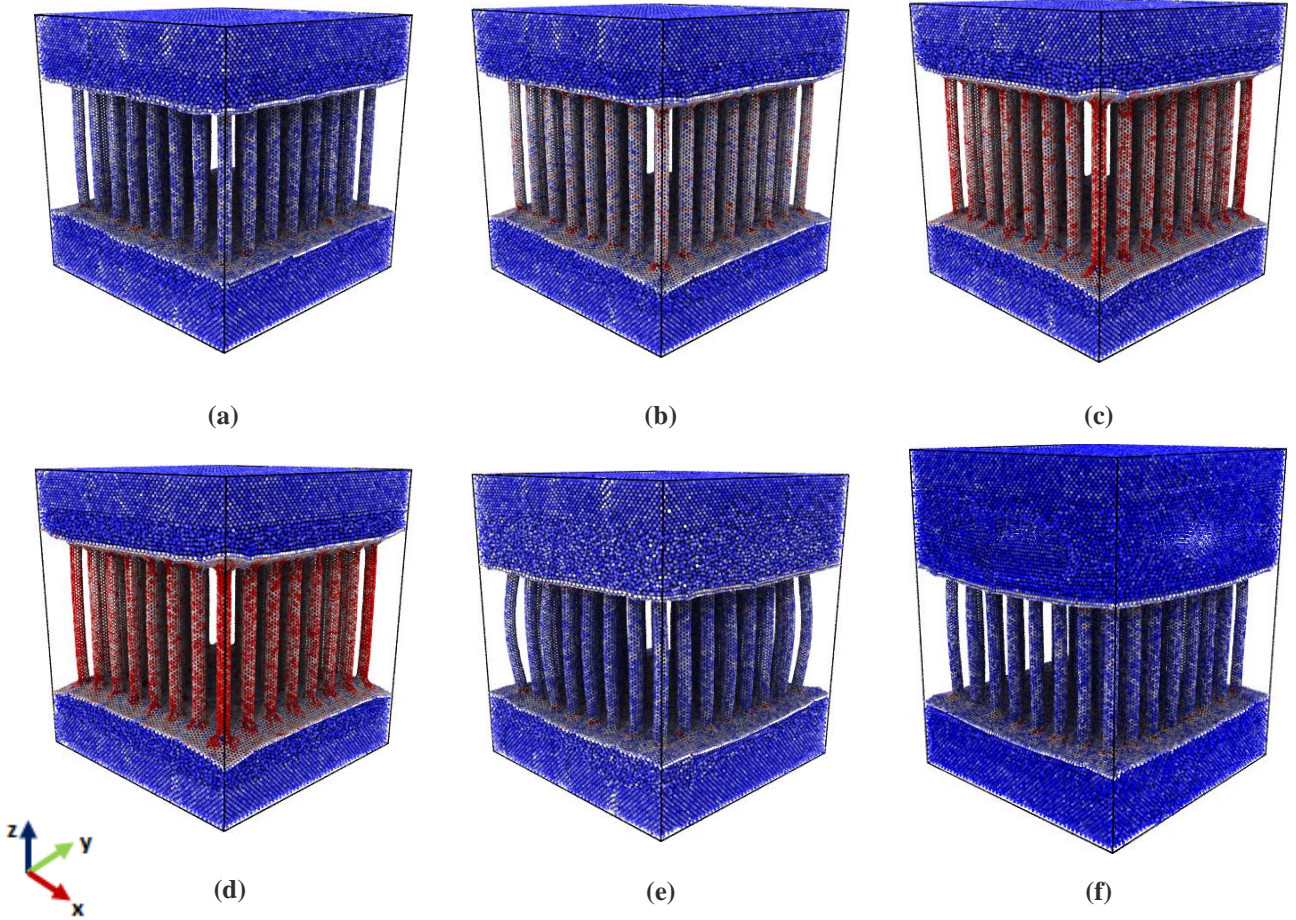
Şekil 3. Pt-Al-GKNT yapılarının Z doğrultusundaki (KNT doğrultusu) çekme gerilme-şekil değiştirme eğrileri.

Platin-alüminyum(Pt-Al) kompozit yapısı ile dört farklı KNT içeren Pt-Al-GKNT yapılar için MD simülasyonlarından elde edilen çekme gerilme-şekil değiştirme eğrileri, Şekil 3'te verilmiştir. Yapıların KNT doğrultusundaki gerilme şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde Pt-Al yapılarına GKNT yapısının eklenmesi ile elde edilen Pt-Al-GKNT yapıların sünekliği azalsa da mekanik dayanımlarının arttığı görülmüştür. Modellerde yer alan KNT çapı arttıkça lineer ve maksimum gerilme bölgesinde çekme dayanımının azaldığı sünekliğin ise arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum yapıdaki KNT çaplarının artmasına bağlı olarak sayılarındaki azalmadan kaynaklanabilir. Maksimum gerilme mukavemeti açısından en yüksek değer küçük fakat çok sayıda KNT içeren Pt-Al-GKNT(6x6) yapısına aittir. Tokluk açısından yapılar arasında büyük değişimler gözlemlenmemiştir. Süneklik açısından ise KNT (12x12) içeren yapının daha iyi olduğu görülmüştür.

GKNT yapılarının ve KNT boyutlarının mekanik özellikler üzerindeki etkilerinin daha iyi anlaşılabilmesi için Tablo 2'de verilen elastik modülü, akma mukavemeti ve maksimum gerilme değerleri incelendiğinde GKNT yapılarının Pt-Al yapısının elastik modülü ve maksimum gerilme değerini artırmış olduğu görülmektedir. Ayrıca akma gerilmesi ve akma şekil değiştirme değerleri de artmıştır. Bu artışın KNT'ün sert yapısından ve KNT ve grafenler arasında oluşturulan güçlü bağlardan

kaynaklandığı düşünülmektedir. Karbon yapılarının sert kimyası malzemenin maksimum şekil değiştirme değerini düşürerek sünekliğini azaltmıştır[28, 40]. Elastik modülü ve maksimum gerilme değeri KNT çapının azalması ve buna bağlı olarak KNT sayısının artması ile artmıştır. Benzer şekilde maksimum gerilme değerleri KNT çapının azalması (sayısının artması) ile artarken akma gerilmesi ve akma şekil değiştirmesi azalmaktadır. Elastik modülü ve maksimum gerilme değeri açısından en yüksek değer Pt-Al-GKNT(6x6) yapısına aittir. Akma gerilesi açısından ise Pt-Al-GKNT(12x12) yapısı daha iyi değerler göstermektedir.

Şekil 4'te KNT doğrultusunda çekme yüklemesine maruz kalan Pt-Al-GKNT yapısının deformasyon mekanizmasının örnek bir gösterimi verilmiştir. Pt-Al-GKNT(6x6) yapısına ait KNT doğrultusundaki deformasyon durumları incelendiğinde $\epsilon=0.124$ şekil değiştirme değerine kadar gerilmelerin arttığı görülmektedir. Gerilmelerin büyük çoğunluğunu KNT'ler taşımaktadır. KNT'ler içerisinde sınırlarda yer alan KNT'lerde daha yüksek gerilmeler oluşmuştur. En yüksek gerilmeler KNT'lerde oluşsa da $\epsilon=0.124$ değerinden sonra kopmaların Al bölgesinde gerçekleştiği görülmüştür. Kopmanın Grafen ve KNT bağlantı noktalarında gerçekleşmemesi bu iki yapı arasında güçlü kovalent bağların oluşturulduğunu göstermiştir[31]. Deformasyon görüntülerinden de bu bağların yüksek gerilme taşıdığı ve düzenli olduğu görülmektedir.



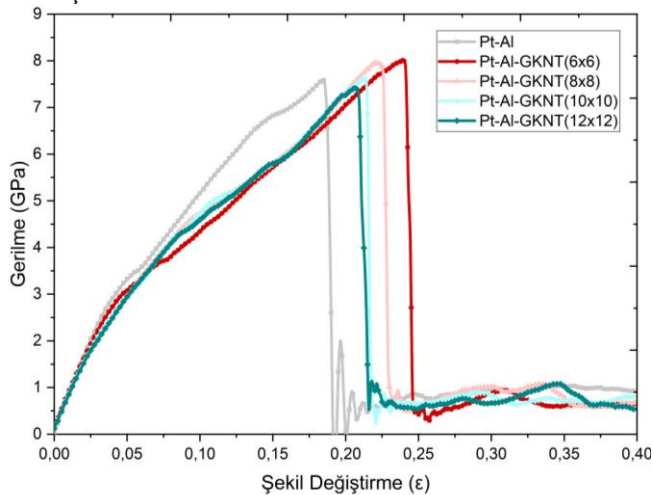
Şekil 4. KNT doğrultusunda çekme yüklemesine maruz kalan Pt-Al-GKNT(6x6) numunesine ait deformasyon durumları, (a) 0.02, (b) 0.06, (c) 0.10, (d) 0.12, (e) 0.14 ve (f) 0.26.

Tablo 2. KNT doğrultusu (z) boyunca çekme yüklemesine maruz kalan yapıların mekanik özellikleri.

Modeller	Elastik Modül (GPa)	Akma Gerilmesi (GPa)	Akma Şekil Değiştirmesi	Maksimum Gerilme (GPa)	Maksimum Şekil Değiştirme
Pt-Al	51.515	3.081	0.0638	6.831	0.189
Pt-Al-GKNT(6x6)	67.659	4.242	0.0653	7.465	0.124
Pt-Al-GKNT(8x8)	62.871	4.115	0.0697	7.290	0.131
Pt-Al-GKNT(10x10)	58.961	4.770	0.0854	7.187	0.135
Pt-Al-GKNT(12x12)	51.153	6.485	0.130	7.125	0.144

Göze çarpan bir diğer önemli husus ise Şekil 4. e'de ($\epsilon=0.140$) gözlemlendiği gibi sınırlarda yer alan KNT'lerdeki burkulma davranışdır. Bu durum, yapıdaki gerilmelerin $\epsilon=0.124$ değerine kadar artması ve bu değerden sonra yapıdaki kopmaların gerçekleşmesi ile gerilen KNT bağlarının bir yay davranışı sergileyen salınım hareketinden kaynaklanmaktadır. Bu salınım davranışı ile KNT'ler, yapıyı tekrar eski konumuna dönmeye zorlayan çekme yönüne zıt yönlü kuvvetin etkisi ile önce basma yüküne maruz kalarak burkulma davranışı sergiler ardından ise salınımların sönümlenmesi ile tekrar eski konumuna dönerek düzleşmektedir. KNT'lerin düzleştiği Şekil 4. f'de görülmektedir.

Deformasyon görüntülerinden de bu bağların yüksek gerilme taşıdığı ve düzenli olduğu görülmektedir. Diğer yapıların deformasyon görüntüleri incelendiğinde benzer bir karakter sergiledikleri ve gerilmelerin KNT bölgesinde yoğunlaştığı görülmüştür. KNT çapı arttıkça yapıların maksimum gerilme dayanımları azalırken yapıda kopmanın gerçekleştiği strain değerleri artmaktadır. KNT(8x8), KNT(10x10) ve KNT(12x12) için sırasıyla kopma $\epsilon=0.131$, $\epsilon=0.135$ ve $\epsilon=0.144$ değerinde alüminyum bölgesinde gerçekleşmiştir. Küçük çaplı KNT'lerin yer aldığı yapıların daha yüksek gerilme değerlerine direnç göstermesi küçük çap ve düşük atom sayılarından dolayı diğer yapılara kıyasla çok sayıda KNT içermesidir.



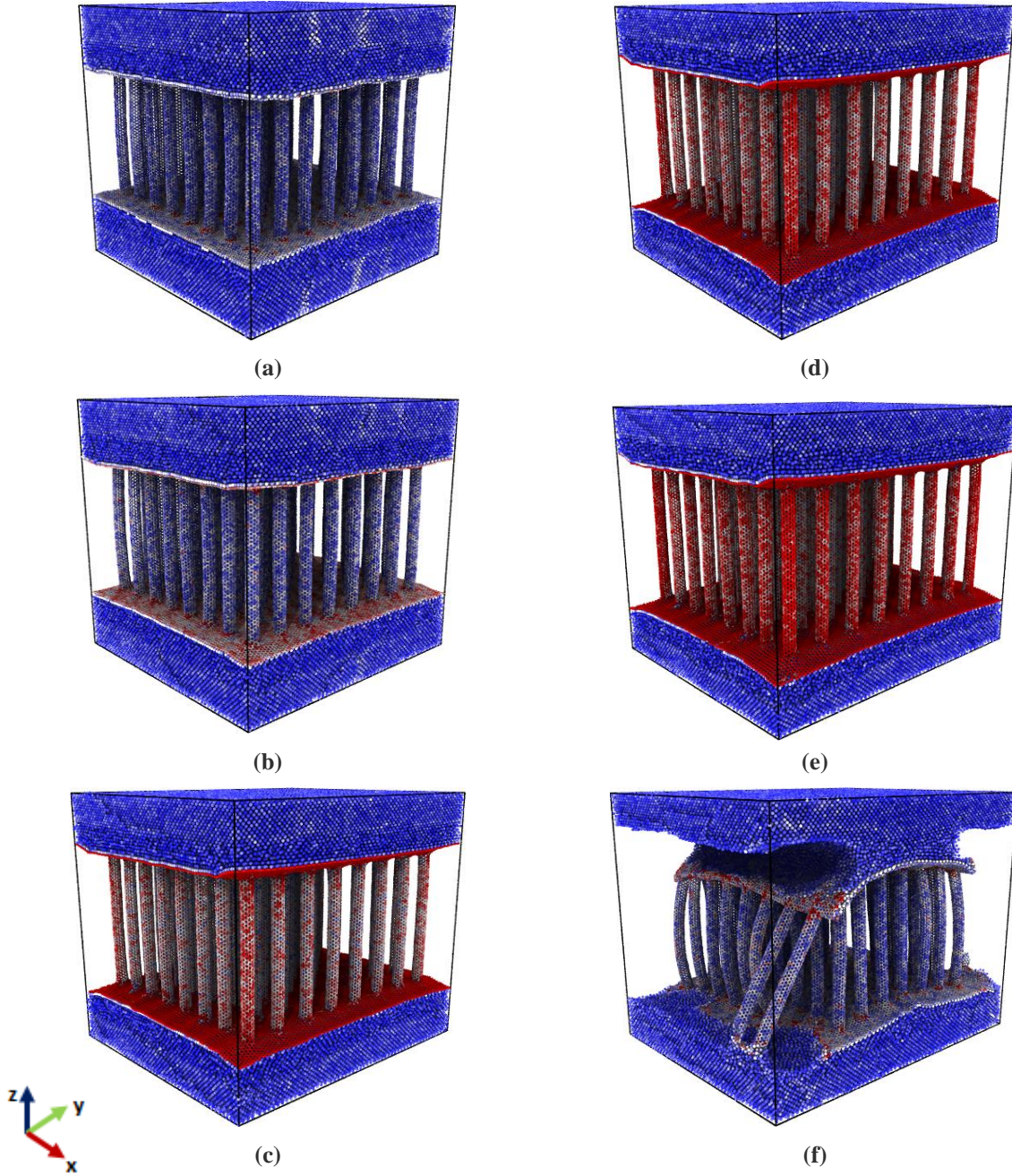
Şekil 5. Pt-Al-GKNT yapılarının Y doğrultusundaki (grafen doğrultusu) çekme gerilme-şekil değiştirme eğrileri.

Yapıların Grafen doğrultusundaki (Y) çekme dayanımları incelendiğinde (Şekil 5) $\epsilon=0.025$ şekil değiştirme değerine kadarki lineer bölgede tüm modellerin benzer davranış gösterdiği görülmüştür. Gerilmeler arttıkça Pt-Al yapılarına kıyasla G-KNT'li yapılarda gerilmenin eğimi azalmış sünekliliği ve tokluğu artmıştır. Bu bölgedeki gerilme düşüşünün grafenlerde yer alan bölgesel bağ kopmalarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yapıda yer alan KNT'lerin çapı düştükçe maksimum gerilme dayanımı ve şekil değiştirme değeri artmaktadır. Maksimum gerilme değeri açısından en yüksek değer küçük çaplı KNT'lerin yer aldığı Pt-Al-GKNT(6x6) yapısında elde edilmiştir. KNT çapı arttıkça maksimum gerilme değerlerinin düştüğü görülmüştür. Tokluk ve süneklilik açısından incelendiğinde yine en iyi sonuçlar en düşük çaplı KNT içeren yapılarda görülmüştür. Gerilme değerlerindeki düşüşler ise kademeli olarak gerçekleşmiştir. Gerilme değerleri Tablo 3'de verilen sayısal değerler üzerinden incelendiğinde elastik modüllerinin hemen hemen aynı olduğu bulunmuştur. G-KNT yapılarının varlığı ve KNT çapının artması akma gerilmesi ve akma şekil değiştirmesini azaltmıştır. Maksimum gerilme değeri ise G-KNT varlığı ve KNT çapının azalması ile artmıştır.

Pt-Al-GKNT(6x6) yapısının grafen doğrultusundaki (y doğrultusu) çekme yükü altındaki deformasyon görüntüleri Şekil 6'da verilmiştir. Deformasyon görüntüleri incelendiğinde gerilmelerin çoğunlukla yapıdaki grafenlerde biriktiği görülmüştür. Grafen ve KNT'ler arasında oluşturulan kovalent bağlardan dolayı KNT'lerde de gerilmeler yüksektir. Bu durum aynı zamanda arada oluşturulan kovalent bağların gücünü de ortaya koymaktadır. Deformasyon görüntüleri de bu bağların yüksek gerilme taşıdığı ve düzenli olduğunu doğrulamıştır. Şekil değiştirme değerlerinin $\epsilon=0.239$ 'a kadar artması ile beraber gerilmelerin arttığı görülmüştür. KNT'ler içerisinde uçlarda yer alan KNT'lerde daha yüksek gerilmeler oluşmuştur. Maksimum gerilme değerinden sonra yapıdaki kopmalar grafen ve Al bölgesinden başlamak üzere gerçekleşmiştir. Farklı çaplarda KNT içeren yapıların deformasyon görüntüleri incelendiğinde benzer bir karakter sergiledikleri ve çoğunlukla gerilmeleri grafenlerin taşıdığı görülmüştür. KNT çapı arttıkça maksimum dayanımın ve şekil değiştirme değerlerinin azaldığı görülsede kopmalar benzer şekilde grafen ve alüminyum bölgesinde gerçekleşmiştir.

Tablo 3. Grafen doğrultusu (Y) boyunca çekme yüklemesine maruz kalan yapıların mekanik özellikleri.

Modeller	Elastik Modül (GPa)	Akma Gerilmesi (GPa)	Akma Şekil Değişirnesi(ϵ)	Maksimum Gerilme (GPa)	Maksimum Şekil Değişirnesi(ϵ)
Pt-Al	58.622	3.325	0.0572	7.220	0.185
Pt-Al-GKNT(6x6)	59.129	3.086	0.0505	8.035	0.239
Pt-Al-GKNT(8x8)	58.621	2.941	0.0498	7.974	0.221
Pt-Al-GKNT(10x10)	58.583	2.857	0.0476	7.645	0.213
Pt-Al-GKNT(12x12)	58.178	2.821	0.0472	7.445	0.206

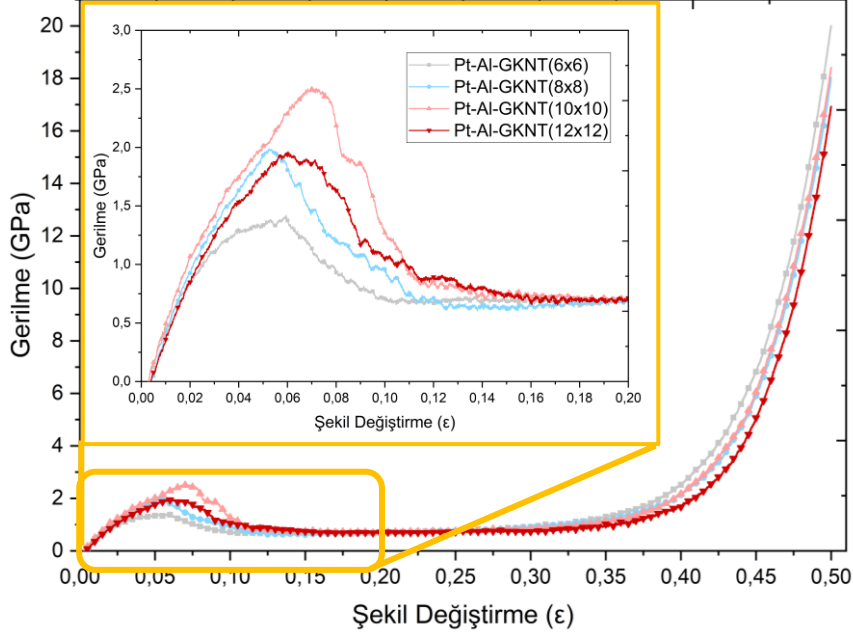


Şekil 6. Pt-Al-GKNT(6x6) yapısının Y doğrultusundaki (grafen doğrultusu) çekme gerilme-şekil değişirme eğrileri, (a) 0.02, (b) 0.06, (c) 0.16, (d) 0.20, (e) 0.24 ve (f) 0.26.

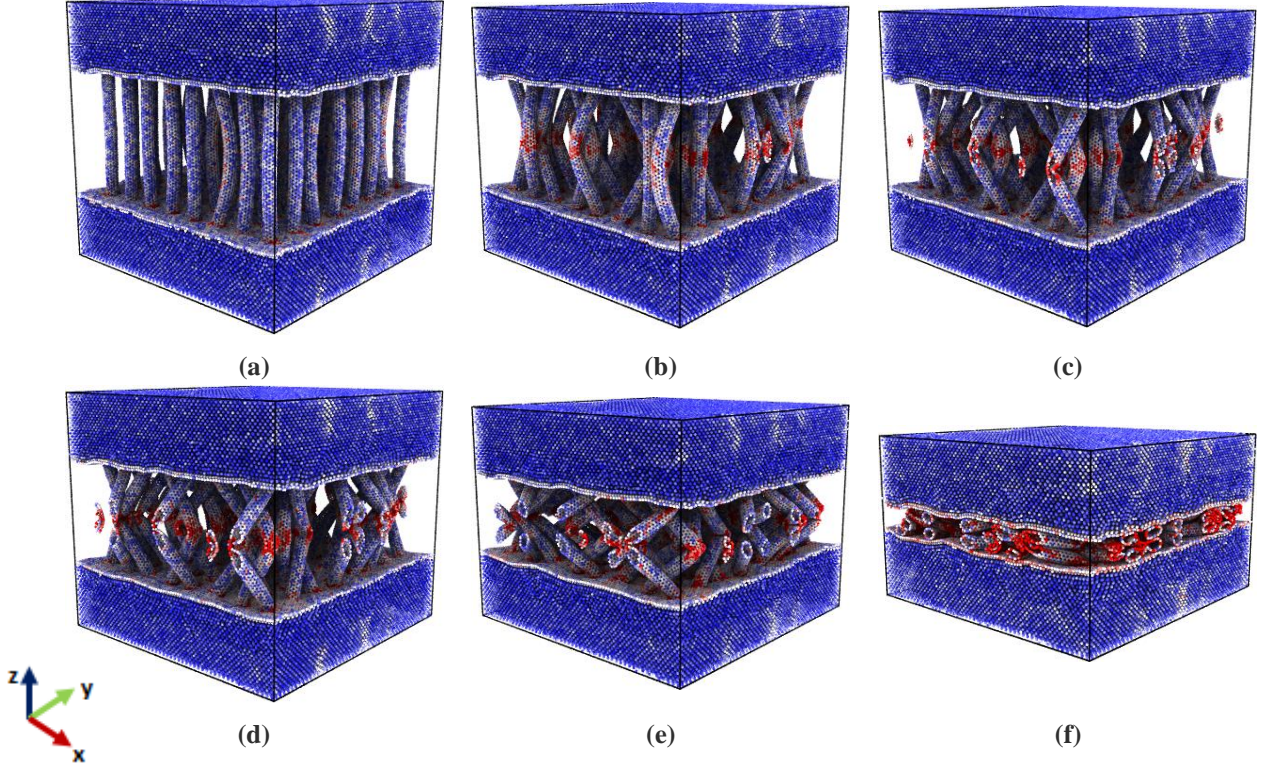
Basma Davranışı

Kovalent olarak bağlanmış grafen-KNT sandviç yapısının Pt-Al yapısı ile birleştirilmesinin bir sonucu olarak basma performanslarını incelemek için, Farklı Pt-Al-GKNT yapılarının karşılaştırmalı basınç gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 7’de verilmiştir. Davranışlar incelendiğinde üç farklı bölge gözlenmiştir. İlk bölgede yapıdaki gerilmelerin lineer olarak $\epsilon=0.06-0.08$ (GKNT6x6–GKNT10x10) değerine kadar arttığı görülmüştür. Ardından gerilmeler belirli bir değere kadar düşmekte ($\epsilon=0.15$) ve sonrasında $\epsilon=0.35$ değerine kadar yapı şekil değiştirirse de gerilmeler

yatay kalmaktadır. Bu değerden sonra gerilmelerin arttığı yoğunlaşma bölgesinin olduğu görülmüştür. KNT boyutları açısından yapılar değerlendirildiğinde lineer bölgede belirli bir değere kadar KNT’lerin çapı arttıkça taşınan gerilme değerlerinin ve KNT dayanımlarının daha yüksek olduğu görülmüştür. Fakat KNT10x10’dan daha büyük çapta KNT kullanılması durumunda ise değerler düşmektedir. Yoğunlaşma ve sertleşme bölgesinde ise daha küçük çaplı KNT’lerde kısmen de olsa daha büyük gerilmeler oluşmaktadır.



Şekil 7. Pt-Al-GKNT yapılarının Z doğrultusundaki (KNT doğrultusu) basma gerilme-şekil değiştirme eğrileri.



Şekil 8. Pt-Al-GKNT(6x6) yapısının Z doğrultusundaki (KNT doğrultusu) basma gerilme-şekil değiştirme eğrileri, (a) 0.02, (b) 0.06, (c) 0.08, (d) 0.10, (e) 0.20 ve (f) 0.40.

Gerilmadaki davranışların daha iyi anlaşılabilmesi için malzemelerin gerilme görüntüleri incelenmiştir (Şekil 8). Yapıda oluşan ilk gerilmeler alüminyumdan ziyade en dar kesite sahip KNT'lerde oluşmuştur. Gerilmelerin artması ile birlikte KNT'lerde eğilmelerin başladığı ve $\epsilon=0.06-0.08$ değerine kadar arttığı görülmüştür. Bu değerden sonra KNT'lerde meydana gelen yanal deformasyonlardan dolayı gerilmeler hızlıca düşmektedir. Ardından grafikte yer alan yatay bölgede şekil değişimine bağlı KNT'lerin etrafında bulunan boşlukların kapandığı görülmüş bu sebeple gerilmeler oluşmamıştır. Boşluklar kapandıktan sonra yoğunlaşma bölgesindeki gibi gerilmelerin tekrar arttığı görülmüştür. Farklı KNT çaplarına sahip yapılar incelendiğinde büyük çaplı KNT içeren yapılarda ilk bölgedeki gerilme azalışları daha büyük şekil değiştirmelerde gerçekleşmiştir. Bunu nedeni KNT sayılarının azalmasına rağmen etki alanlarının genişlemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Pt-Al-GKNT12x12 yapısında ise etki alanları artmasına rağmen KNT sayılarındaki azalmanın daha etkili olmasından dolayı lineer bölgede gerilme değerleri tekrar düşmüştür.

Sonuç

Özetle, bu çalışmada, platin ve alüminyum levhalar arasında yerleştirilmiş kovalent olarak bağlı Grafen KNT yapılarından oluşan yeni bir nanoyapı sunulmuştur. Ayrıca, numunelerin termodinamik stabiliteyi kontrol edildikten sonra MD simülasyonları ile mekanik özellikleri araştırılmıştır. Grafen ve KNT yapıları arasında güçlü kovalent bağlar oluşturulmuştur. Önerilen bu yapı saf Pt-Al yapısına kıyasla çekme yüklemesi altında daha yüksek elastik modül, maksimum gerilme ve şekil değiştirme değeri sergilemektedir. Yapı doğası gereği an izotropik bir davranış sergilemektedir. Ayrıca, KNT çapının yapının mekanik dayanımı üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. Küçük çaplı KNT'lerin çekme ve basma dayanımının daha iyi olduğu görülmüştür. Yapılarda yer alan KNT sayılarının da çap boyutları gibi mekanik dayanımı etkilemekte ve çapları küçük olsa da çok sayıda KNT içeren yapılarda dayanım daha iyidir. Önerilen bu çalışma ile Pt-Al yapısına kıyasla daha hafif ve daha yüksek çekme dayanımına sahip bir nanoyapı ortaya koyulmuştur. İlerleyen çalışmalarda, KNT uzunluklarının yapının mekanik davranış üzerindeki etkileri araştırılarak ideal KNT boyutları belirlenebilir. Bunun yanı sıra farklı KNT diziliminin etkileri ve hidrojen depolama özelliklerinin araştırılması da ilgi çekici bir konu olabilir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Kaynaklar

- [1] A. Pujari *et al.*, "Carbon Hybrid Materials—Design, Manufacturing, and Applications," *Nanomaterials*, vol. 13, no. 3, doi: 10.3390/nano13030431.
- [2] K. Xia, H. Zhan, and Y. Gu, "Graphene and Carbon Nanotube Hybrid Structure: A Review," *Procedia IUTAM*, vol. 21, pp. 94-101, 2017/01/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.piutam.2017.03.042>.

- [3] Y. Shi *et al.*, "Strengthening and deformation mechanisms in nanolaminated single-walled carbon nanotube-aluminum composites," *Mater. Sci. Eng. A.*, vol. 764, p. 138273, 2019/09/09/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138273>.
- [4] J. Hou, W. Du, G. Parande, M. Gupta, and S. Li, "Significantly enhancing the strength + ductility combination of Mg-9Al alloy using multi-walled carbon nanotubes," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 790, pp. 974-982, 2019/06/25/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.03.243>.
- [5] D. H. Nam, S. I. Cha, B. K. Lim, H. M. Park, D. S. Han, and S. H. Hong, "Synergistic strengthening by load transfer mechanism and grain refinement of CNT/Al-Cu composites," *Carbon*, vol. 50, no. 7, pp. 2417-2423, 2012/06/01/ 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.01.058>.
- [6] M. S. L. Hudson, H. Raghubanshi, D. Pukazhselvan, and O. N. Srivastava, "Carbon nanostructures as catalyst for improving the hydrogen storage behavior of sodium aluminum hydride," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 3, pp. 2750-2755, 2012/02/01/ 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.03.006>.
- [7] C. Soldano, A. Mahmood, and E. Dujardin, "Production, properties and potential of graphene," *Carbon*, vol. 48, no. 8, pp. 2127-2150, 2010/07/01/ 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.01.058>.
- [8] Z. Zhou, X. Wang, S. Faraji, P. D. Bradford, Q. Li, and Y. Zhu, "Mechanical and electrical properties of aligned carbon nanotube/carbon matrix composites," *Carbon*, vol. 75, pp. 307-313, 2014/08/01/ 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.04.008>.
- [9] U. Degirmenci and M. Kirca, "Design and mechanical characterization of a novel carbon-based hybrid foam: A molecular dynamics study," *Comput. Mater. Sci.*, vol. 154, pp. 122-131, 2018/11/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2018.06.039>.
- [10] Z. Ozturk, C. Baykasoglu, and M. Kirca, "Sandwiched graphene-fullerene composite: A novel 3-D nanostructured material for hydrogen storage," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 15, pp. 6403-6411, 2016/04/27/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.042>.
- [11] J. Wang, Z. Li, G. Fan, H. Pan, Z. Chen, and D. Zhang, "Reinforcement with graphene nanosheets in aluminum matrix composites," *Scripta Materialia*, vol. 66, no. 8, pp. 594-597, 2012/04/01/ 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.01.012>.
- [12] Z. Zhao *et al.*, "Mechanical, thermal and interfacial performances of carbon fiber reinforced composites flavored by carbon nanotube in matrix/interface," *Composite Structures*, vol. 159, pp. 761-772, 2017/01/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.022>.

- [13] U. Degirmenci, A. S. Erturk, M. B. Yurtalan, and M. Kirca, "Tensile behavior of nanoporous polyethylene reinforced with carbon-based nanostructures," *Comput. Mater. Sci.*, vol. 186, p. 109971, 2021/01/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2020.109971>.
- [14] E. Coşkun, E. A. Zaragoza-Contreras, and H. J. Salavagione, "Synthesis of sulfonated graphene/polyaniline composites with improved electroactivity," *Carbon*, vol. 50, no. 6, pp. 2235-2243, 2012/05/01/ 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.01.041>.
- [15] Y. Zhang *et al.*, "Load transfer of graphene/carbon nanotube/polyethylene hybrid nanocomposite by molecular dynamics simulation," *Composites Part B: Engineering*, vol. 63, pp. 27-33, 2014/07/01/ 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.03.009>.
- [16] J. Y. Wu, J. Y. He, and Z. L. Zhang, "Fracture and negative Poisson's ratio of novel spanned-fullerenes nanotube networks under tension," *Comput. Mater. Sci.*, vol. 80, pp. 15-26, 2013/12/01/ 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2013.04.033>.
- [17] A. G. Nasibulin *et al.*, "A novel hybrid carbon material," *Nature Nanotechnology*, vol. 2, no. 3, pp. 156-161, 2007/03/01 2007, doi: 10.1038/nnano.2007.37.
- [18] M. Kirca, X. Yang, and A. C. To, "A stochastic algorithm for modeling heat welded random carbon nanotube network," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 259, pp. 1-9, 2013/06/01/ 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2013.02.014>.
- [19] D. Chakravarty *et al.*, "3D Porous Graphene by Low-Temperature Plasma Welding for Bone Implants," *Advanced Materials*, <https://doi.org/10.1002/adma.201603146> vol. 28, no. 40, pp. 8959-8967, 2016/10/01 2016, doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201603146>.
- [20] A. T. Celebi, M. Kirca, C. Baykasoglu, A. Mugan, and A. C. To, "Tensile behavior of heat welded CNT network structures," *Comput. Mater. Sci.*, vol. 88, pp. 14-21, 2014/06/01/ 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2014.02.040>.
- [21] Z. Fan *et al.*, "Thermal and electrical properties of graphene/carbon nanotube aerogels," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 445, pp. 48-53, 2014/03/20/ 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2013.12.083>.
- [22] L. Xu, N. Wei, Y. Zheng, Z. Fan, H.-Q. Wang, and J.-C. Zheng, "Graphene-nanotube 3D networks: intriguing thermal and mechanical properties," *Journal of Materials Chemistry*, 10.1039/C1JM13799A vol. 22, no. 4, pp. 1435-1444, 2012, doi: 10.1039/C1JM13799A.
- [23] G. K. Dimitrakakis, E. Tylianakis, and G. E. Froudakis, "Pillared Graphene: A New 3-D Network Nanostructure for Enhanced Hydrogen Storage," *Nano Letters*, vol. 8, no. 10, pp. 3166-3170, 2008/10/08 2008, doi: 10.1021/nl801417w.
- [24] M. Kirca, "Design and analysis of sandwiched fullerene-graphene composites using molecular dynamics simulations," *Composites Part B: Engineering*, vol. 79, pp. 513-520, 2015/09/15/ 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.04.050>.
- [25] U. Degirmenci and M. Kirca, "Carbon-based nano lattice hybrid structures: Mechanical and thermal properties," *Physica E Low Dimens. Syst. Nanostruct.*, vol. 144, p. 115392, 2022/10/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.physe.2022.115392>.
- [26] S. Pal, P. N. Babu, B. S. K. Gargeya, and C. S. Becquart, "Molecular Dynamics simulation based investigation of possible enhancement in strength and ductility of nanocrystalline aluminum by CNT reinforcement," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 243, p. 122593, 2020/03/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122593>.
- [27] D. M. Park, J. H. Kim, S. J. Lee, and G. H. Yoon, "Analysis of geometrical characteristics of CNT-Al composite using molecular dynamics and the modified rule of mixture (MROM)," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 32, no. 12, pp. 5845-5853, 2018/12/01 2018, doi: 10.1007/s12206-018-1133-5.
- [28] S. E. Shin, H. J. Choi, J. H. Shin, and D. H. Bae, "Strengthening behavior of few-layered graphene/aluminum composites," *Carbon*, vol. 82, pp. 143-151, 2015/02/01/ 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.10.044>.
- [29] K. Choi, J. Seo, D. Bae, and H. Choi, "Mechanical properties of aluminum-based nanocomposite reinforced with fullerenes," *T. NONFERR. METAL SOC.*, vol. 24, pp. s47-s52, 2014/07/01/ 2014, doi: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63287-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63287-8).
- [30] F. A. Yunusov, T. V. Larionova, E. V. Bobrynina, T. J. Ma, and O. V. Tolochko, "Aluminum-based composite reinforced with fullerene soot," *Mater. Today: Proc.*, vol. 30, pp. 640-644, 2020/01/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.449>.
- [31] A. S. Erturk, Y. O. Yildiz, and M. Kirca, "Mechanical behavior of a novel carbon-based nanostructured aluminum material," *Comput. Mater. Sci.*, vol. 144, pp. 193-209, 2018/03/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2017.12.033>.
- [32] W. Humphrey, A. Dalke, and K. Schulten, "VMD: Visual molecular dynamics," *Journal of Molecular Graphics*, vol. 14, no. 1, pp. 33-38, 1996/02/01/ 1996, doi: [https://doi.org/10.1016/0263-7855\(96\)00018-5](https://doi.org/10.1016/0263-7855(96)00018-5).
- [33] J. F. Shackelford and W. Alexander, *CRC materials science and engineering handbook*. CRC press, 2000.
- [34] F. Y. Meng, S. Q. Shi, D. S. Xu, and R. Yang, "Size effect of X-shaped carbon nanotube junctions," *Carbon*, vol. 44, no. 7, pp. 1263-1266, 2006/06/01/ 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2005.10.049>.

- [35] S. Plimpton, "Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics," *Journal of Computational Physics*, vol. 117, no. 1, pp. 1-19, 1995/03/01/ 1995, doi: <https://doi.org/10.1006/jcph.1995.1039>.
- [36] X. Yang, F. Qiao, X. Zhu, P. Zhang, D. Chen, and A. C. To, "Coalescence of parallel finite length single-walled carbon nanotubes by heat treatment," *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 74, no. 3, pp. 436-440, 2013/03/01/ 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2012.11.006>.
- [37] M. Höhnerbach and P. Bientinesi, "Accelerating AIREBO: Navigating the Journey from Legacy to High-Performance Code," *Journal of Computational Chemistry*, vol. 40, no. 14, pp. 1471-1482, 2019/05/30 2019, doi: <https://doi.org/10.1002/jcc.25796>.
- [38] B. H. Morrow and A. Striolo, "Morphology and Diffusion Mechanism of Platinum Nanoparticles on Carbon Nanotube Bundles," *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 111, no. 48, pp. 17905-17913, 2007/12/01 2007, doi: 10.1021/jp071474o.
- [39] Y.-H. Lin, T.-C. Chen, P.-F. Yang, S.-R. Jian, and Y.-S. Lai, "Atomic-level simulations of nanoindentation-induced phase transformation in mono-crystalline silicon," *Applied Surface Science*, vol. 254, no. 5, pp. 1415-1422, 2007/12/30/ 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.06.071>.
- [40] S. E. Shin and D. H. Bae, "Deformation behavior of aluminum alloy matrix composites reinforced with few-layer graphene," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 78, pp. 42-47, 2015/11/01/ 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.001>.



Boriding Effect on the Hardness of AISI 1020, AISI 1060, AISI 4140 Steels and Application of Artificial Neural Network for Prediction of Borided Layer

Mehmet ÖZER¹, Fatih BALIKOĞLU², Tayfur Kerem DEMİRCİOĞLU^{3*}, Yunus Emre NEHRİ⁴

¹ Balıkesir University, Department of Transportation Services, ozer@balikesir.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-6212-1217

² Balıkesir University, Mechanical Engineering Department, fatih@balikesir.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-3836-5569

³ Balıkesir University, Mechanical Engineering Department, tkerem@balikesir.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-0518-0739

⁴ Balıkesir University, Mechanical Engineering Department, yunusnehri@balikesir.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-2119-9031

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received 11 November 2023

Received in revised form 23

February 2024

Accepted 4 March 2024

Available online 29 March 2024

Keywords:

artificial neural network,
boronizing, borides

Artificial neural network approach was used to predict the thicknesses of total (FeB+Fe₂B), FeB and Fe₂B borides layers of AISI 1020, AISI 1060, and AISI 4140 steels. Boronizing heat treatment was conducted in a solid medium comprising of EKabor®2 powders at 840–960 °C at 40 °C intervals for 2, 4, 6, and 8 hours. Optical microscope analysis of the borided layer revealed the saw-tooth (columnar) and planar morphology. The depth of the total (FeB+Fe₂B), FeB and Fe₂B boride layers was accurately predicted. For total boride layers generated by the artificial neural network model, the average error varied between 0.04 and 7.64 μm. Micro hardness values increased by 423% in AISI 1020, 336% in AISI 1060, and 411% in AISI 4140 after the boronizing process.

Doi: 10.24012/dumf.1389301

* Corresponding author

Introduction

The need to improve surface properties such as corrosion resistance, wear resistance, oxidation resistance and friction has led to the development of numerous surface improvement methods, which are decisive in increasing the service life of many engineering components [1]. Boronizing, which is one of them, is a thermochemical process in which boron atoms diffuse from the surface of the steel alloys towards the interior. Generally, boronizing process is applied in range of 700 °C – 1050 °C and 0.5 to 10 hours. Boronizing is applied to improve the surface properties of steels such as corrosion and wear resistance [2]. Boriding process can be carried out in solid, liquid, or gaseous medium. The most widely used boriding method is the pack method, which has the advantages of ease of application and low cost [3, 4].

Boriding produces single-phase (Fe₂B) or dual-phase (FeB + Fe₂B) iron boride surface compounds. Depending on the concentration of the diffused boron atoms, the boride layer may consist of tetragonal Fe₂B (8 wt % B) and/or orthorhombic FeB (16 wt % B) [5]. In general, the FeB phase, which has a lower toughness than the Fe₂B phase, is characterized by a higher hardness [6, 7]. The presence of a dual-phase layer (FeB + Fe₂B) is undesirable for industrial

applications because each phase has very different properties such as coefficient of thermal expansion (CTE) and elastic modulus; The CTE of FeB and Fe₂B are 23 and 8 × 10⁻⁶ °C⁻¹, respectively, while Young's modulus is 510 GPa and 280 GPa, respectively. Such differences in properties can generate high compressive residual stresses at the interface (FeB + Fe₂B) during the formation of the layers. It can lead to the formation and propagation of cracks at the interface of the two phases [8, 9]. Furthermore, the FeB phase is undesirable in the boride layer due to its higher brittleness, which induces shedding from the surface when subjected to strong external loads [10, 11].

Boronizing process can be applied to many materials such as surface hardened steels, annealed steels, tool steels, stainless steels, cast irons, sintered metal powders, nickel, cobalt, molybdenum, titanium, non-ferrous metals and their alloys, and some super alloys and cermet [9, 12]. The most significant characteristics of boride phases generated by boriding are high hardness (1400-5000 HV) and high melting temperature (1400-1550 °C) [13, 14]. Boriding is a surface hardening method that can obtain the hardest layer on the surface compared to other methods [15, 16]. It is well known that the fatigue life of boronized industrial metals increases as surface hardness increases [17, 18]. The boron

layer thickness, which generally occurs in low carbon unalloyed steels, is up to 0.4 mm. The increased amount of carbon or the presence of the alloying element (Cr, V and others) causes the layer thickness to decrease [19, 20]. Besides, a high amount of chromium (for example) encourages the formation of FeB rather than Fe₂B. Kul, M., et al. [21] applied surface hardening process to the camshafts made of AISI-1045 steel by boronizing in liquid and solid media. To obtain the hardest and thickest boride layer in the samples, the proposed composition in the liquid medium was 70% Borax (Na₂B₄O₇) + 30% B₄C. Furthermore, the results indicated that a suitable composition for solid media boriding is 5% B₄C + 90% SiC + 5% KBF₄. Joshi, A. A., et al. used the package boriding process for small, medium, and large sized containers made of AISI 4140 steel for 2 and 3 hours at 950 °C. The results showed that the morphology of the Fe₂B phase was columnar, and the hardness decreased from the surface towards the inner part. A maximum surface hardness of about 1367 HV_{0.1} was obtained for boronized steel [22]. Şahin, S. applied the solid boriding process on AISI 1020, AISI 1040 and AISI 2714 steels at 900 °C in 2 and 4 hours using Ekabor I powder. It was observed that the dimensional increase of the samples was one-fifth of the boride layer thickness for both AISI 1020 and AISI 1040, and one-third of the boride layer thickness for AISI 2714. The authors proposed the term “threshold roughness”, which corresponds to the surface roughness value for boron-treated smooth surfaces [23].

This study evaluates the enhancements in boron diffusion depths and hardness values of AISI 1020, AISI 1060, and AISI 4140 steel specimens obtained using the pack boriding process. The effect of temperature and time parameters in boriding process was investigated. With the artificial neural network (ANN) application, the prediction was made for the total, FeB and Fe₂B boride layer thicknesses.

Materials and Method

Materials

Pack boriding process was applied for low carbon AISI 1020, high carbon AISI 1060 and alloy AISI 4140 steel materials. The contents of the AISI 1020, AISI 1060 and AISI 4140 steel specimens are given in Table 1. The cylindrical test specimens with a diameter of 15 mm and a height of 20 mm were used.

Application of Boronizing Process

Three replicates were prepared for different temperature and time parameters to determine the effect of boronizing on the surface hardness of AISI 1020, AISI 1060 and AISI 4140 steels. For comparison, one sample of each specimen was subjected to the necessary measurements without boronizing. Boronizing test parameters and specimen codes

are shown in Table 2. Boronizing process was carried out under these conditions.

Boronizing heat treatment was performed in a solid state. For each test condition, 9 samples were placed in the stainless-steel box and heated in the furnace. The test period begins when the furnace reaches the desired temperature. Boron powder, "EKabor®2" is used as a boron supplying compound in the form of B₄C - SiC - KBF₄. The particle size of the powders is (75 - 106 µm). After filling the stainless-steel box with 2 cm of EKabor®2 powder, the specimens are placed at least 1 cm apart from the sides and from each other. The specimens were then filled with 2 cm EKabor®2 powder, Ekrit® powder was added as deoxidant on the top, and the cover was closed. Ekrit® consists of pure iron and oxide scavenger components. All samples were subjected to boronization process using this method at different temperatures and times. Following the boronizing heat treatment, the specimens were removed from the box and cleaned after cooling.

Metallographic Examination

Boronized specimens with dimensions of Ø 15 × 20 mm were cut into half along the radius axis using a precision cutting instrument and prepared for metallographic examinations.

Specimens with rectangular cross-sections were grinded with sandpaper numbers 180, 220, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, respectively, at a speed of 200 rpm in the “Buehler-Metaserv” grinder/polisher device. After that in the same device, they were polished on the broadcloth with 6 µm and 1 µm diamond polishers. The polished specimens were etched with 4% Nital (Nital: HNO₃+Ethyl Alcohol) solution for 10 seconds.

The microstructure photographs of the specimens prepared for metallographic examination were taken with a Nikon MA 100 optical microscope. The FeB phase close to the surface and the Fe₂B phase below this phase can be distinguished due to the color difference obtained by etching. The depth of the boride layer formed on the cross-sectional surfaces of the samples was measured with the same optical microscope and marked on photographs.

Hardness Measurement

The hardness distributions of the coating and matrix were measured with the Shimadzu micro hardness device. Hardness tests were carried out using a Micro-Vickers tip with 50 g load and 10 sec. Hardness measurements were conducted inward from the surface of all samples were carried out in the range of 20 – 50 µm. A wider range was made in the samples with a greater diffusion depth, and a narrower range was made in the samples with a low diffusion depth.

Table 1. The chemical compositions of the AISI 1020, AISI 1060 and AISI 4140 steels.

Materials	C%	Si%	Mn%	P<	S<	Cr	Mo	Ni
AISI 1020	0.38-0.45	0.15-0.40	0.50-0.80	0.035	0.035	0.90-1.20	0.15-0.30	-
AISI 1060	0.18-0.25	0.15-0.35	0.30-0.60	0.035	0.035	-	-	-
AISI 4140	0.55-0.64	0.10-0.30	0.60-0.90	0.040	0.050	-	-	-

The measurement was taken at regular intervals from the surface to the matrix, and the arithmetic average of at least five replicates was calculated. It was observed that the hardness values of the formed boron layer measured inward from the surface are compatible with the literature [22, 24, 25]

Artificial Neural Networks Simulation Model

Artificial neural networks (ANN) are a computational model inspired by neurons in the human brain and the connections between them [26]. Neural networks are well-known as a very general statistical framework for predicting sample data from a set of data [27].

Artificial neural networks enable the creation of a computational model inspired by the biological neural network structure, using neurons for computation. In the artificial neural network system, there are three layers: input, hidden, and output. The input layer represents the independent variables and transmits these variables to the hidden layer with certain weight coefficients. The processed information in the hidden layer is then sent to the output layer for computation. The output layer represents the dependent variable obtained based on the independent variables from the input layer. The network used in this study is presented in Figure 7. In this study, steel type, time, and temperature are taken as independent variables. The dependent variables are the boron layer thickness affected by these independent variables ($\text{Fe}_2\text{B}+\text{FeB}$), Fe_2B thickness, and FeB phase. In the experimental results, 64 data (80% of test data) were used to train the artificial neural network, and the remaining 16 data (20% of test data) were used to train the artificial neural network. The TRAINLM algorithm is used in the training of artificial neural networks because it is fast and has high memory. As the structure of the network, a more reliable “feed-forward backprop”, which proceeds with the control of errors, was chosen. The LEARNM learning function and the TANSIG transfer function are used for network learning. Training was carried out using 12 hidden neurons in 3 layers. As seen in Figure 7, there are five different parameters as independent variables. Five different input parameters as three different steel specimens, temperature, and time were taken into consideration.

Results and Discussion

Hardness and Microstructure Analysis

AISI 1020 Steel

Figure 1 a, b, c shows the dual-phase ($\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$) layers of boronized AISI 1020 steel at 840, 880 and 920 °C for 8 hours, respectively. The Fe_2B layer was isolated with the FeB teeth for the AISI 1020 specimens, which boronized for 8 hours. The thickness of the FeB layer on the surface increased with increasing temperature up to 920 °C. Diffusion depths of the AISI 1020 steel boronized at 840, 880, 920 and 960 °C for 8 hours were 116 μm ($\pm 2 \mu\text{m}$), 119 μm ($\pm 5 \mu\text{m}$), 199 μm ($\pm 5 \mu\text{m}$), 211 μm ($\pm 8 \mu\text{m}$), respectively. Figure 1 d, e shows the single-phase Fe_2B layer of AISI 1020 steel boronized at 960 °C for 2 and 4 hours, respectively. By doubling the heat treatment time,

the Fe_2B phase became more prominent as it was very isolated; the Fe_2B layer thickness increased and showed saw-tooth structures. Diffusion depth of AISI 1020 steel boronized at 960 °C for 2 and 4 hours, respectively, increased from 24 μm ($\pm 1 \mu\text{m}$) to 64 μm ($\pm 3 \mu\text{m}$), respectively. The dual-phase structure was observed as a result of applying heat for 6 and 8 hours at 960 °C (Fig. 1 f, g). Diffusion depths resulting from boronizing at 960 °C for 6 and 8 hours were measured as 141 μm ($\pm 7 \mu\text{m}$) and 211 μm ($\pm 8 \mu\text{m}$), respectively. Figure 4 shows the variation of boron diffusion depth of AISI 1020 steels with temperature and time. The results showed that a deeper diffusion layer was formed in each time period of 960 °C compared to other temperature conditions. In comparison to AISI 1060 steel and AISI 4140 steel, AISI 1020 steels tend to exhibit a high micro hardness throughout deeper distances. Since the boriding morphology for AISI 1020 had discontinuous saw-tooth structures, the measured hardness values varied depending on the testing area compared to other samples. In AISI 1020 steels, the increase in hardness values depending on the temperature for the 8-hour boriding time was lower compared to the AISI 1060 and AISI 4140 samples (Fig 5a-c).

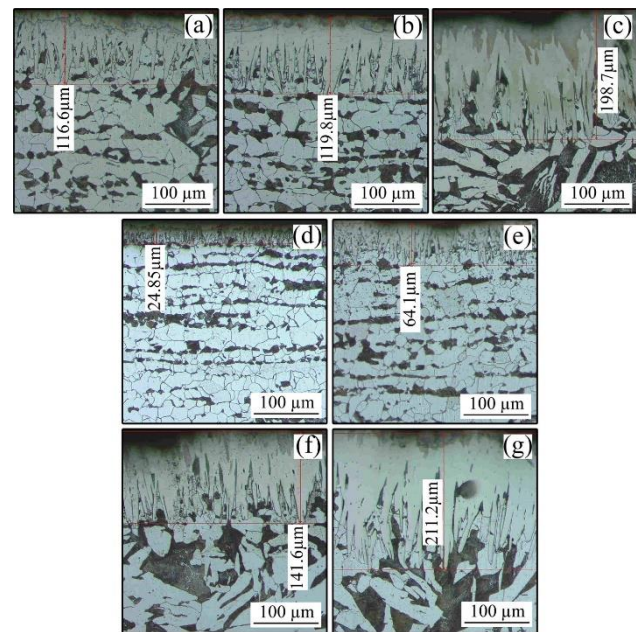


Figure 1. Microstructure images of AISI 1020 steel

AISI 1060 Steel

Figure 2 a, b, c shows the dual-phase ($\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$) layer of AISI 1060 boronized steel at 840, 880 and 920 °C for 8 hours. The diffusion depth of AISI 1060 boronized steel at 840, 880 and 920 °C for 8 hours was measured as 100 μm ($\pm 2 \mu\text{m}$), 124 μm ($\pm 3 \mu\text{m}$) and 188 μm ($\pm 5 \mu\text{m}$), respectively. Figure 2 d, e shows the single phase Fe_2B layer of AISI 1060 boronized steel at 960 °C for 2 and 4 hours, respectively. The diffusion depth of AISI 1060 boronized steel at 960 °C for 2 and 4 hours increased from 22 μm ($\pm 1 \mu\text{m}$) to 58 μm ($\pm 2 \mu\text{m}$), respectively. The dual-phase structure was observed as a result of 6 and 8 hours of heat

treatment at 960 °C (Fig. 2 f, g). The diffusion depths as a result of the boronization at 960 °C for 6 and 8 hours was measured as 162 μm (± 4 μm) and 204 μm (± 6 μm), respectively. The fluctuation of boron diffusion depth as a function of temperature and time in AISI 1020 steels is summarized in Figure 4. The saw-tooth morphology was located more frequently since AISI 1060 steels contain more carbon than AISI 1020 steel. For AISI 1060 steels, as seen in Figure 5b, the hardness increase trend in the Fe₂B and FeB layers is more noticeable.

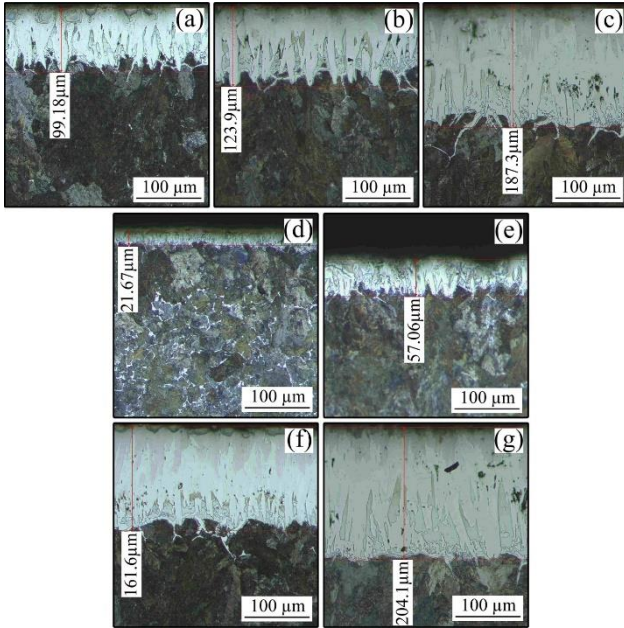


Figure 2. Microstructure images of AISI 1060 steel

AISI 4140 Steel

Figure 3 a, b, c shows the dual-phase (FeB + Fe₂B) layers of boronized AISI 4140 steel at 840, 880, 920 and 960 °C. The diffusion depth of AISI 4140 boronized steel at 840, 880, 920 and 960 °C for 8 hours was measured as 84 μm (± 1 μm), 114 μm (± 1 μm), 156 μm (± 2 μm) and 204 μm (± 2 μm), respectively. It was observed that Fe₂B showed a saw-tooth structure at 840, 880 and 920 °C for 8 hours. As a result of the heat treatment at 960 °C for 8 hours, it was seen that the Fe₂B phase had a planar structure (Fig.3 g). Figure 3 e, f shows the single phase Fe₂B layer of AISI 4140 boronized steel at 960 °C for 2 and 4 hours. The heat treatment at 960 °C for 6 hours produced FeB+Fe₂B dual-phase structures (Fig.3 f). Figure 4 shows the boron diffusion depth of AISI 4140 steels as a function of temperature and time. As AISI 4140 steel had a planar boron layer, the hardness test values were more uniform across the diffusion depth. The hardness value of AISI 4140 steels maintained low when compared to other materials as a result of the boriding method used with the temperature increase during an 8-hour period (Fig. 5c).

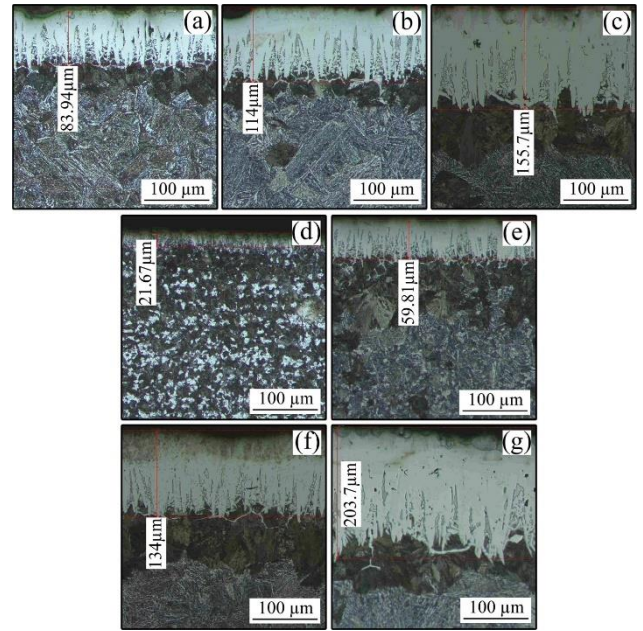


Figure 3. Microstructure images of AISI 4140 steel

Table 2. Boride layer thicknesses depending on temperature and time.

Boriding parameters		Thicknesses of boride layers		
Temperature (°C)	Time (h)	AISI 1020 (μm)	AISI 1060 (μm)	AISI 4140 (μm)
840	2	9.15	12.86	9.33
	4	42.9	37.18	35.73
	6	79.11	57.57	60.97
	8	111.6	99.18	83.94
880	2	12.13	15.12	8.85
	4	26.11	29.39	32.62
	6	75.94	51.76	50.9
	8	119.8	123.9	114
920	2	22.35	17.3	27.17
	4	53.83	56.82	43.17
	6	110.8	106.5	102.1
	8	198.7	187.3	155.7
960	2	24.85	21.63	21.67
	4	64.1	57.06	59.81
	6	141.6	161.6	134
	8	211.2	204.1	203.7

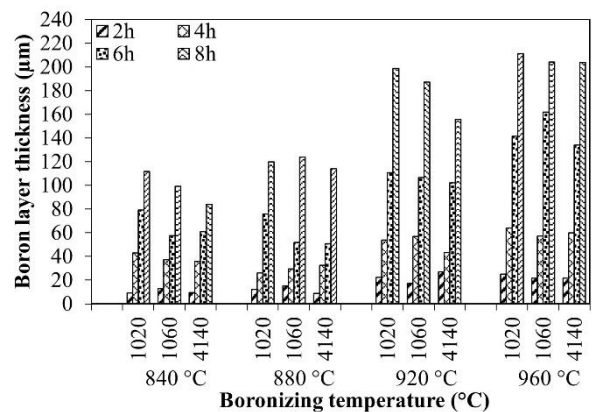


Figure 4. Boron diffusion depth as a function of temperature and time

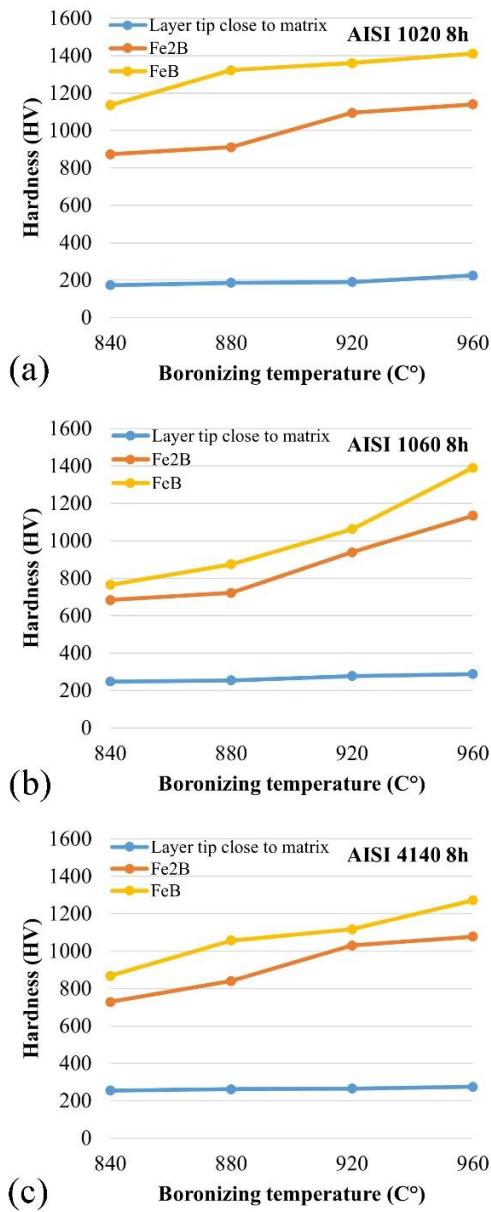


Figure 5. Hardness levels of samples as a function of temperature at 8 hours boronizing process

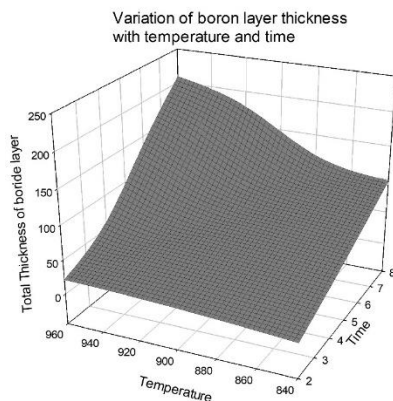


Figure 6. Variation of boron layer thickness with temperature and time

Artificial neural network approach

The purpose of using artificial neural networks in this study is to estimate the boron layer thickness by applying different temperatures on AISI 1020, AISI 1060 and AISI 4140 steels at different times. Table 3 provides knowledge about the ANN network. As seen in Figure 7, there are five different parameters as independent variables. Five different input parameters as three different steel specimens, temperature and time were taken into consideration. The boron layer thickness resulting from five different input parameters, the predicted values of Fe₂B and FeB, and the regression coefficients with the relationship between the measurement values are presented as seen in Table 4. The changes were made in the number of neurons, learning rates and momentum coefficients and the optimum network structure was decided.

Table 3. Networks details

Training	Levenberg-Marquardt
Network of Structure	feed-forward backprop
Learning Function	LEARNGDM
Transfer Function	TANSIG
Performance	Mean Squared Error
Calculations	MEX

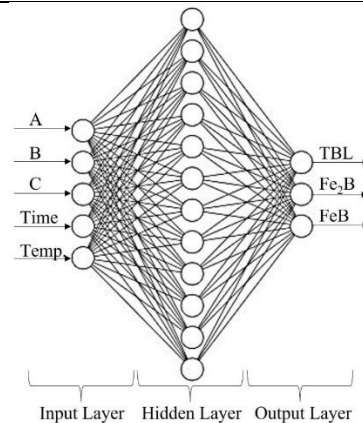


Figure 7. The structure of neural network

The actual values of the boride thicknesses measured because of the experiments and the predicted layer thicknesses given by ANN model are given in Table 4. It was observed that the predicted values approached the regression line by means of the conditional averages obtained. All experiments were performed at 95% confidence intervals. The regression coefficient ($R^2 > 0.99$) indicated that the models constructed in the experimental analysis were relatively robust and therefore the ratios were acceptable (Figure 8). As seen in Figure 9, the model prediction shows a good agreement with experimental results. The error in the total boride layer thickness for different processing times varies between 0.04 and 7.64 μm .

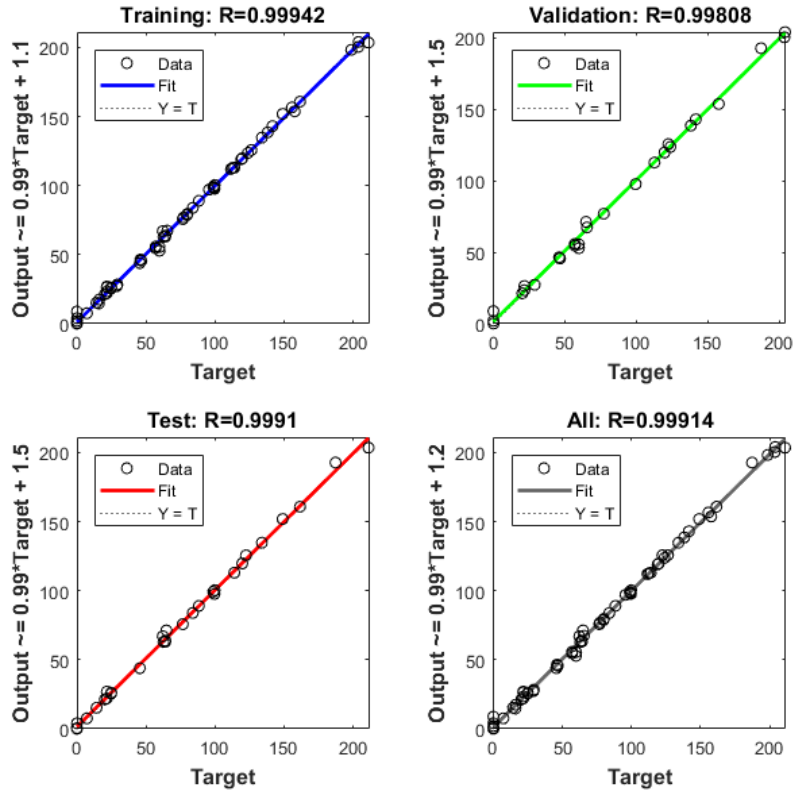


Figure 8. Regression analysis

Table 4. Actual and predicted boride layers

A	B	C	Time (h)	Temperature (°C)	Total thickness of boride layer (µm)	Predicted total thickness of boride layer (µm)	Error (µm)	Thickness of Fe ₂ B layer (µm)	Predicted thickness of Fe ₂ B layer (µm)	Error (µm)	Thickness of FeB layer (µm)	Predicted thickness of FeB layer (µm)	Error (µm)
1	0	0	4	960	59.81	55.53	4.279	59.81	52.85	6.965	0	8.83	8.832
1	0	0	6	960	134	134.73	0.735	88.38	89.05	0.668	45.61	43.91	1.701
1	0	0	8	840	83.94	83.87	0.067	76.71	75.76	0.952	7.23	7.57	0.342
1	0	0	8	880	114	113.06	0.944	99.75	100.38	0.628	14.25	15.28	1.032
1	0	0	8	920	155.7	156.61	0.906	126.42	125.78	0.644	29.27	28.39	0.883
0	1	0	2	960	21.63	21.99	0.359	21.67	26.97	5.302	0	0	0.002
0	1	0	4	960	57.06	55.88	1.175	57.06	54.68	2.382	0	2.06	2.058
0	1	0	8	840	99.18	98.5	0.683	80.01	79.6	0.408	16.17	17.46	1.287
0	1	0	8	880	123.9	123.7	0.203	77.26	77	0.259	46.64	45.64	1.002
0	1	0	8	920	187.3	192.83	5.525	122.47	125.68	3.214	64.83	71.24	6.415
0	1	0	8	960	204.1	204.06	0.043	157.7	153.78	3.917	46.03	46.52	0.485
0	0	1	4	960	64.1	63.16	0.945	64.1	63.83	0.275	0	4.02	4.02
0	0	1	6	960	141.6	143.04	1.439	112.7	112.81	0.115	28.9	27.22	1.679
0	0	1	8	840	111.6	112.05	0.447	95.7	97.02	1.319	15.9	14.63	1.271
0	0	1	8	920	198.7	198.34	0.357	119	119.09	0.092	79.7	78.7	0.997
0	0	1	8	960	211.2	203.56	7.641	149	151.92	2.916	62.2	67.07	4.866

*A=AISI 1020, B=AISI 1060, C=AISI 4140

Figure 9 illustrates a comparison of the thickness of the predicted borided layer with the experimental results. There is a considerable agreement between the experimental and predicted findings. Based on these results, it can be concluded that neural network approach has emerged as an option to model the boriding process.

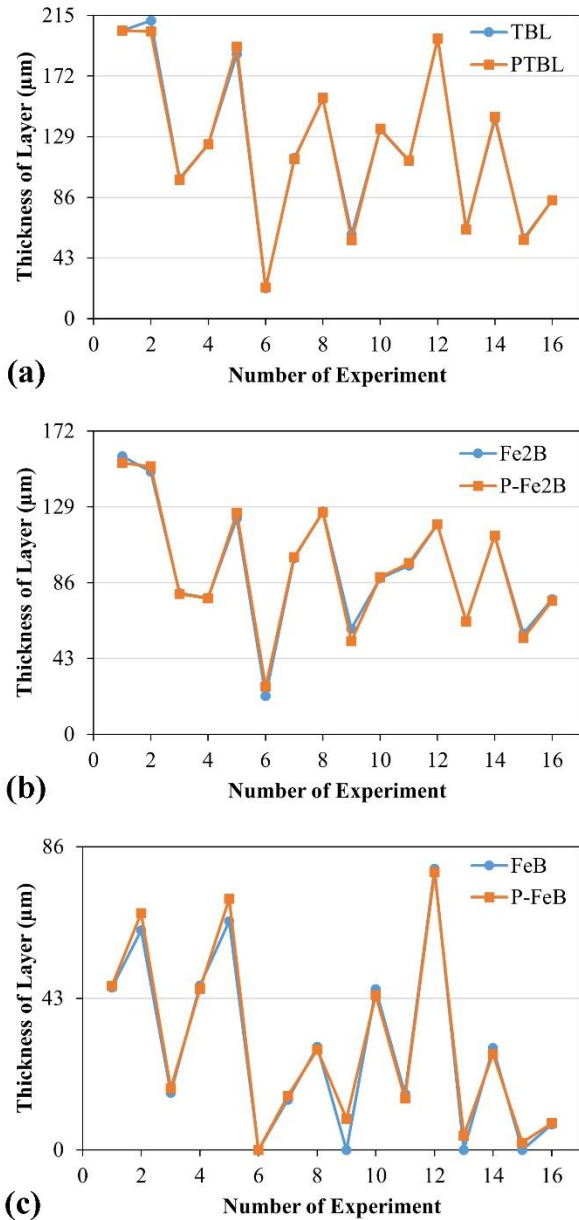


Figure 9. Comparison of predicted and experimental results of total boride (a), Fe₂B (b) and FeB (c) layer thicknesses (TBL: Total thickness of boride layer, PTBL: Predicted total thickness of boride layer, P-Fe₂B: predicted thickness of Fe₂B, P-FeB: thickness of FeB layer).

Conclusion

As expected, as the duration of the boronization process increased, the boron diffusion depth increased, and this resulted in an increase in the volume of materials. This

increment should be taken into account considering sizing boronized materials.

Since the boron diffusion depth was higher in AISI 1020 steel, the dimensions increased more than the AISI1060 and AISI4140 specimens. The increase in dimensions was followed by AISI 1060 and AISI 4140 specimens.

Boron layer depth in all samples showed with increase in boronizing time. The lowest boron layer occurs at 2-hour boronizing, while the largest boron layer occurs at 8-hour boronizing.

Metallographic investigations revealed that the boride layer formed by the boron compounds in the AISI 1020 specimens has a columnar and saw-tooth structure. In the AISI 1060 specimens, on the other hand, the boron layer is formed less columnar and less toothed than the AISI 1020 specimen due to the excess of carbon. In the AISI 4140 specimen, due to the excess of alloying elements, it was observed that a boron layer with a planar geometry than the other two specimens was formed.

The findings of the neural network algorithm used to predict the thickness of the borided layer are quite acceptable for industrial applications. The ANN method produced good results in simulations for predicting boride layers. Prediction accuracy is dependent on the reliability of measured data, which should represent real correlations between temperature, time, and boride layer thickness.

In terms of micro hardness, an increase of 423% in AISI 1020, 336% in AISI 1060 and 411% in AISI 41040 was observed in the samples.

Although the order of untreated sample hardness from the hardest to the softest is AISI 1060 - AISI 4140 - AISI 1020, this order changed from hardest to softest AISI 1020 - AISI 1060 and AISI 4140 after boronization process.

Ethics committee approval and conflict of interest statement

Ethics committee approval is not required for this study.

There is no conflict of interest for this study.

Authors' Contributions

We declare that all authors equally contribute.

References

- [1] T. Balusamy, T. S. Narayanan, K. Ravichandran, I. S. Park, and M. H. Lee, "Pack boronizing of AISI H11 tool steel: Role of surface mechanical attrition treatment," *Vacuum*, vol. 97, pp. 36-43, 2013.
- [2] M. Kulka, M. Kulka, and Castro, *Current trends in boriding*. Springer, 2019.
- [3] O. Ozdemir, M. Omar, M. Usta, S. Zeytin, C. Bindal, and A. Ucisik, "An investigation on boriding kinetics of AISI 316 stainless steel," *Vacuum*, vol. 83, no. 1, pp. 175-179, 2008.

- [4] Y. Kayalı, "Investigation of diffusion kinetics of borided AISI P20 steel in micro-wave furnace," 2015.
- [5] I. Campos-Silva, M. Ortiz-Domínguez, N. López-Perrusquia, A. Meneses-Amador, R. Escobar-Galindo, and J. Martínez-Trinidad, "Characterization of AISI 4140 borided steels," *Applied Surface Science*, vol. 256, no. 8, pp. 2372-2379, 2010.
- [6] A. Günen, M. S. Gök, A. Erdoğan, B. Kurt, and N. Orhan, "Investigation of microabrasion wear behavior of boronized stainless steel with nanoboron powders," *Tribology Transactions*, vol. 56, no. 3, pp. 400-409, 2013.
- [7] M. S. Gök, Y. Küçük, A. Erdoğan, M. Öge, E. Kanca, and A. Günen, "Dry sliding wear behavior of borided hot-work tool steel at elevated temperatures," *Surface and Coatings Technology*, vol. 328, pp. 54-62, 2017.
- [8] A. I. H. Committee and A. S. f. M. H. T. Division, *Heat treating*. ASM international, 1991.
- [9] C. Martini, G. Palombarini, G. Poli, and D. Prandstraller, "Sliding and abrasive wear behaviour of boride coatings," *Wear*, vol. 256, no. 6, pp. 608-613, 2004.
- [10] L. Yu, X. Chen, K. A. Khor, and G. Sundararajan, "FeB/Fe₂B phase transformation during SPS pack-boriding: boride layer growth kinetics," *Acta Materialia*, vol. 53, no. 8, pp. 2361-2368, 2005.
- [11] H. Cimenoglu, E. Atar, and A. Motallebzadeh, "High temperature tribological behaviour of borided surfaces based on the phase structure of the boride layer," *Wear*, vol. 309, no. 1-2, pp. 152-158, 2014.
- [12] E. Atk, U. Yunker, and C. Meriç, "The effects of conventional heat treatment and boronizing on abrasive wear and corrosion of SAE 1010, SAE 1040, D2 and 304 steels," *Tribology International*, vol. 36, no. 3, pp. 155-161, 2003.
- [13] A. K. Sinha, "Boriding(Boronizing)," *ASM International, ASM Handbook.*, vol. 4, pp. 437-447, 1991.
- [14] N. Maragoudakis, G. Stergioudis, H. Omar, E. Pavlidou, and D. Tsipas, "Boro-nitriding of steel US 37-1," *Materials Letters*, vol. 57, no. 4, pp. 949-952, 2002.
- [15] Y. Kar, N. Şen, and A. Demirbaş, "Boron minerals in Turkey, their application areas and importance for the country's economy," *Minerals & Energy-Raw Materials Report*, vol. 20, no. 3-4, pp. 2-10, 2006.
- [16] H. B. Özerkan, "Simultaneous machining and surface alloying of AISI 1040 steel by electrical discharge machining with boron oxide powders," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 32, no. 9, pp. 4357-4364, 2018.
- [17] R. I. Stephens, A. Fatemi, R. R. Stephens, and H. O. Fuchs, *Metal fatigue in engineering*. John Wiley & Sons, 2000.
- [18] Y. Murakami, "Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions," Elsevier Science Ltd. UK," 2002.
- [19] R. Pereira, F. Mariani, A. Neto, G. Totten, and L. Casteletti, "Characterization of layers produced by boriding and boriding-PVD on AISI D2 tool steel," *Materials Performance and Characterization*, vol. 5, no. 4, pp. 406-413, 2016.
- [20] I. Ozbek and C. Bindal, "Mechanical properties of boronized AISI W4 steel," *Surface and Coatings Technology*, vol. 154, no. 1, pp. 14-20, 2002.
- [21] M. Kul, I. Danacı, Ş. Gezer, and B. Karaca, "Effect of boronizing composition on hardness of boronized AISI 1045 steel," *Materials Letters*, vol. 279, p. 128510, 2020.
- [22] A. A. Joshi and S. S. Hosmani, "Pack-boronizing of AISI 4140 steel: boronizing mechanism and the role of container design," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 29, no. 9, pp. 1062-1072, 2014.
- [23] S. Şahin, "Effects of boronizing process on the surface roughness and dimensions of AISI 1020, AISI 1040 and AISI 2714," *Journal of materials processing technology*, vol. 209, no. 4, pp. 1736-1741, 2009.
- [24] İ. Türkmen and E. Yalamaç, "Effect of Alternative Boronizing Mixtures on Boride Layer and Tribological Behaviour of Boronized SAE 1020 Steel," *Metals and Materials International*, pp. 1-15, 2021.
- [25] F. Fernandes, L. Casteletti, S. Heck, and G. Totten, *Wear evaluation of pack boronized AISI 1060 steel*. ASTM International, 2013.
- [26] K. Kasiviswanathan, K. Sudheer, and J. He, "Quantification of prediction uncertainty in artificial neural network models," in *Artificial neural network modelling*: Springer, 2016, pp. 145-159.
- [27] R. Hristev, "The ANN book," ed: Edition, 1998.



Düşük yük koşulları altında tek silindirli dizel bir motorun yanma ve emisyonlarının tolüen ilavesi ile değişiminin sayısal olarak incelenmesi

Numerical investigation of toluene addition and changes in combustion and emissions of a single cylinder diesel engine under low load conditions

Mutlu Okcu^{1*}, Müjdat Fırat²

¹ Ardahan Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, mutluokcu@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8226-0994>

² Fırat Üniversitesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, mfirat@firat.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6978-9044>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 24 Kasım 2023
Revizyon 15 Şubat 2024
Kabul 21 Şubat 2024
Online 29 Mart 2024

Anahtar Kelimeler:

*Dizel motor,
Tolüen,
Sayısal modelleme,
Emisyon*

ÖZ

19. yüzyılın başından itibaren adım adım gelişen içten yanmalı motorlar, günümüzde insanoğlunun yaşamın tüm alanlarında etkin rol almaktadırlar. Özellikle dizel motorlar, yüksek verimleri nedeniyle birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu avantajına rağmen, dizel motorların çevre ve insan sağlığı açısından zararlı etkileri olan emisyonların azaltılması gibi çözmesi gereken problemleri mevcuttur. Yapılan çalışmada, dizel motorlarda motor performansında herhangi bir azalma olmadan zararlı emisyonların azaltılması amacıyla tolüen kullanılmıştır. Çalışmada dizele %10'dan %50'a %10 artırılarak ilave edilen tolüenin motor performans ve emisyonlara etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Bu çalışmada, test koşulları %20 sabit motor yükü ve 2400 d/d olarak belirlenmiştir. Sayısal çalışma için ANSYS Forte adlı paket programı kullanılmıştır. Elde edilen bulgulara göre, dizel içindeki tolüen oranının %40'a kadar artırılmasının tüm testlerde optimum olarak hem motor performansı hem de emisyonları üzerinde olumlu etkisi olmuştur. Özellikle %10 oranında tolüen kullanımında (T10) CO ve HC emisyonunda %61 ve %43 oranlarında azalma meydana gelirken, NOx emisyonunda %35 oranında artış olmuştur. Ayrıca motor performansı adına önemli olan termik verim ve OİB'nin de T10 kullanımında %8.5 ve %8 oranlarında arttığı belirlendi. Termik verim, OİB, CO ve HC emisyonlarında oldukça önemli sonuçların elde edildiği T10 yakıtının dizel motorların geleceği için önemli rol oynaması beklenmektedir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 24 November 2023
Received in revised form 15 February 2024
Accepted 21 February 2024
Available online 29 Mart 2024

Keywords:

*Diesel engine,
Toluene,
Numerical modeling,
Emissions.*

Doi: 10.24012/dumf.1395573

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

Internal combustion engines are developing step by step since the early nineteenth century, and they now play a key role in a variety of daily life. Diesel engines, in particular, are widely employed in numerous fields due to their great efficiency. Despite this advantage, diesel engines have problems that need to be solved such as reducing emissions, which have harmful effects on the environment and human health. In this study, toluene was used in diesel engines to reduce harmful emissions without any reduction in engine performance. In the presented study, the effect of toluene added to diesel with an increase of 10% from 10% to 50% on engine performance and emissions was investigated numerically. In this study, the test conditions were determined as 20% constant engine load and 2400 rpm. ANSYS Forte package program was used for the numerical study. According to the results obtained, increasing the toluene content in diesel up to 40% has a positive effect on both engine performance and emissions as optimum in all tests. Especially at 10% toluene content (T10), CO and HC emissions decreased by 61% and 43%, while NOx emissions increased by 35%. In addition, it was determined that thermal efficiency and IMEP, which are important for engine performance, increased by 8.5% and 8% when T10 was used. It is expected that T10 fuel, which has very important results in thermal efficiency, IMEP, CO and HC emissions, will play an important role for the future of diesel engines.

Giriş

Günümüzde sanayinin gelişmesi ile birlikte dizel motorların kullanımını oldukça yaygınlaştırmıştır. Bu çağda, dizel motorlar yüksek performansları ve dayanıklılıkları nedeniyle hâlâ ulaşım ve enerji üretimi sektörlerinde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yaygın kullanımlarına rağmen dizel motorlar, insan sağlığına ve çevreye zararlı nitrojen oksit (NO_x) ve partikül madde (PM) gibi önemli emisyonların oluşmasını da arttırdıkları bilinmektedir [1]. Ayrıca, artan enerji taleplerinin karşılanması ve bu taleplerin fosil yakıt kaynakları yoluyla giderilmesi gibi önemli dezavantajlarında dizel motorların baş etmesi gereken zorluklarının olduğu da bilinmektedir [2]. Bu avantaj ve dezavantajlarına rağmen dizel motorların yaygın kullanımlarının devam ettiği görülmektedir. Araştırmacıların, dizel motorlardan kaynaklanan zararlı emisyonların azaltılması için yoğun çalışmaları devam etmektedir. Literatürde yapılan incelemelerde, son yıllarda dizel motorlarda farklı enjeksiyon yöntemlerinin kullanıldığı ve özellikle alternatif yakıt çalışmalarının hız kazandığı tespit edilmiştir. Alternatif yakıtların veya başka bir deyişle fosil yakıt kökenli olmayan büyük oranda alkol kökenli veya biyo-yakıt olarak tarif edilen biyodizellerden oluştuğu gözlenmektedir. Bu çalışmalardan birinde Gürbüz ve arkadaşları, etanol gibi alternatif ve yenilenebilir bir yakıtın dizel motorlarda kullanımının incelendiği bir çalışma yapmışlardır. Yapılan bu çalışmada, dizel motorda etanolün kullanılması, hava kirliliğinde etkili olan NO_x ve partikül madde oranında azalma sağlamıştır. Ancak bu çalışmada CO, HC ve duman (FSN numarası) emisyonlarının önemli oranda arttığı bildirilmiştir [3]. Yapılan araştırmalarda, dizel motorlarda farklı oranlarda biyodizel kullanımının yaygın olduğu görülmektedir. Araştırmacıların, biyodizellerin düşük karışım oranlarında dizel motorlarda kullanılabilirliğinin faydalı olduğu ifade ettikleri çalışmalar mevcuttur [4]. Bununla birlikte, biyodizelin dizel yakıtı göre çevre dostu olması, oksijenli olması, toksik olmaması, setan sayısının yüksek olması ve biyolojik olarak parçalanabilir olması gibi birçok avantajı olduğu bilinmektedir [5]. Biyodizelin dizel motorda kullanımına yönelik yapılan bir çalışma Qenawy ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Yapılan bu çalışmada, dizel motorda kullanılan biyodizelin, HC ve duman değerlerinde azalış sağlamasına rağmen, CO, NO_x ve BTE değerlerinde azalma sağladığı bildirilmiştir [6]. Literatürde biyodizel ve alkollerin alternatif yakıt olarak kullanılmalarının avantajları olmasına rağmen yüksek oranda NO_x, CO ve düşük BTE değerleri gibi çözülmesi gereken zorluklarından da bahsedilmektedir. Dizel motorlarda emisyonların azaltılmasına yönelik olarak farklı enjeksiyon yöntemlerinin kullanıldığı çalışmalarında varlığında artış görülmektedir. Bu çalışmalar genel olarak düşük sıcaklıklı yanma yöntemleri (LTC) olarak ifade edilmektedir. Dizel motorlar için büyük sorun oluşturan zararlı emisyonların, LTC stratejisi ile azaltılabileceği ifade edilmektedir. LTC, kronolojik olarak HCCI (Homojen Yüksek Sıkıştırma-Ateşleme), PCCI (Ön Karışım Şarj Sıkıştırma-Ateşleme) ve RCCI (Reaktivite Kontrollü Sıkıştırma-Ateşleme) konseptlerinden oluşmaktadır. Bu yöntemler ile NO_x ve duman emisyonlarında neredeyse sifıra yakın

değerler elde edilmesine rağmen, özellikle geniş çalışma aralıklarına ulaşamama, yanma aşamalarının kontrol edilememesi ve bazı kirlenici emisyonların (yanmamış HC'ler ve CO) azaltılamaması gibi sorunların devam ettiği görülmektedir [7].

Dizel motorlarından kaynaklanan zararlı emisyonların azaltılmasını hedefleyen birçok çalışma incelenmiştir. Yapılan bu incelemeye göre, her bir yöntemin avantajları kadar dezavantajlarının da olduğu belirlenmiştir. Örneğin, LTC konseptlerinde genel olarak HC ve CO emisyonunda artışların gözlemlendiği bildirilmektedir. Bu artışla birlikte LTC konseptlerinin dizel motorda kullanımı için bazı tasarımsal değişikliklerin de yapıldığı görülmüştür. Bu durumun ek maliyetler oluşturacağı değerlendirilmiştir. Ayrıca, alkol ve biyo kökenli yakıtların belirli oranlarda kullanılmalarının uygun olduğu görülmüştür. Ancak bu yakıtların kullanımında da yüksek viskozite, düşük ısı değeri gibi problemlerinin yanında, yüksek buharlaşma ısı değerlerinin HC ve CO emisyonunda artışların oluşması gibi hala çözülmesi gereken problemleri vardır [8], [9]. İncelenen çalışmalarda NO_x, duman, HC ve CO emisyonlarının genel olarak, yakıt atomizasyonu, viskozite, yanma sıcaklığı tutuşma gecikmesi, yakıtın oksijen/karbon oranı ve setan sayısı gibi temel parametreler bağlı olarak kontrol edilebildiği görülmüştür.

Bu veriler de göz önüne alındığında, yapılan çalışmada dizel motorlardan kaynaklanan zararlı emisyonların optimum seviyede azalmasının yanında motor performansında da azalma olmaması amaçlanmıştır. Bu sebeple, yapılan çalışmada dizel motorlarda tolüen kullanmanın avantajları araştırılmıştır. Tolüen dizelere göre çok daha düşük viskozite, düşük karbon/oksijen oranı ve daha iyi bir hava/yakıt oranı sağlaması [10] ile hem motor performansı hem de emisyonlarda önemli pozitif etkilerinin olacağı bir yakıt olarak ön plana çıkmıştır. Özellikle düşük yüklerde soğuk çalışma şartlarında üretilen CO ve HC emisyonlarının azaltılmasında etkili olması beklenmektedir.

Materyal ve Metot

Sayısal çalışma, ANSYS Forte sayısal paket programı kullanılarak yapılmıştır. İlk olarak ANSYS Workbench bölümünde model uygun ağ yapısına bölünmüştür (model 100 bin adet elemana sahiptir). Daha sonra, kapsamlı kimyasal kinetikleri ve çeşitli yakıt kimyalarını hesaba katmak için CHEMKIN ANSYS ile birlikte kullanılmıştır. Yapılan çalışmada yakıtlar temsili olarak kimyasal kütüphanenin verdiği imkânlarda faydalanılarak oluşturulmuştur. Buna göre, ilave yakıt olarak kullanılan tolüen (C₆H₆) ve dizel olarak n-heptan (C₇H₁₆) kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan motora ait özellikler ve sayısal analizde kullanılan yakıtların özellikleri Tablo 1 ve Tablo 2'de gösterilmektedir.

Sayısal çalışmalarda yanma analizi büyük ölçüde kullanılan motor modelinin geometrisinin doğruluğuna bağlıdır. Bu sebeple, sayısal paket programında kullanılan model gerçek motorun modellenmesi ile elde edilmiştir. Bu modelde emme ve egzoz portları da dâhil olmak üzere eksiksiz bir motor modeli kullanılmıştır. Sayısal çalışmalarda

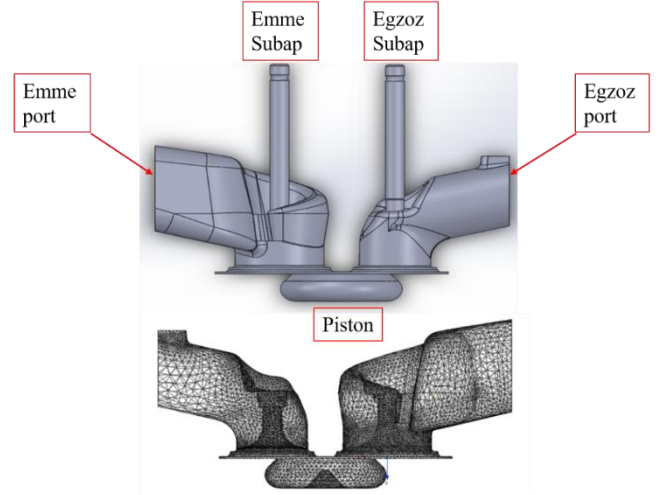
kullanılmak üzere tek silindirli bir dizel motora ait parçalar 3 boyutlu tarayıcı ile taranarak 3 boyutlu geometrik veriler elde edilmiştir. Tarama işlemi sonunda gerçek modelin birebir ve 3 boyutlu katı modeli elde edilerek sayısal çalışmalarda kullanılmıştır. Şekil 1’de gerçek modelden elde edilen motor modeline ait görseller mevcuttur.

Tablo 1. Sayısal çalışmada kullanılan motorun teknik özellikleri.

Güç (3000 d/d)	7.4kW
Silindir sayısı	1
Maksimum tork (2400 d/d)	25.7Nm
Yakıt enjeksiyon basıncı	300 bar
Silindir hacmi	0.406 L
ÇapxStrok	86x70 mm
Sıkıştırma oranı	18.1:1

Tablo 2. Çalışmada kullanılan yakıtların termofiziksel özellikleri [11], [12]

Parametre	Dizel	Tolüen
Yoğunluk (kg/m³)	829.4	865
Kaynama noktası (°C)	180-350	110.8
Parlama noktası (°C)	67	9
Viskozite (mm²/s)	2.889	0.6
Alt ısıl değer (MJ/kg)	43.14	40.9
Buharlaşma gizli ısısı (kJ/kg)	358	-
Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı (°C)	210-250	-
Karbon içeriği (%)	80.13	-
Hidrojen içeriği (%)	12.86	-
Oksijen içeriği (%)	6.35	-
Oktan sayısı	-	120
Setan sayısı	56	9



Şekil 1. Sayısal çalışmada kullanılan model

Çalışmada ilk olarak dizel olarak ifade edilen ve Türkiye’de ticari satışı yapılan yakıt özellikleri kullanılmıştır. Daha sonra hacimsel olarak dizel yakıtına sırasıyla %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında tolüen eklenmiştir. Tolüenin termo-fiziksel özelliği ANSYS Forte programının sağladığı ve literatürde belirtilen özelliklerden oluşmaktadır. Yapılan sayısal çalışmada tolüen ilave oranı, %50 tolüen eklenmesinden sonra motorda yanmanın kararsız bir hal alması nedeniyle %10-%50 aralığındaki oranlarda dizele eklenmiştir. Sayısal çalışmada maksimum tork devri olan 2400 d/d seçilmiş ve %20 sabit motor yükünde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler iki aşamada değerlendirilmiştir. Motor performansı hakkında bilgiler verdiği düşünülen, silindir içi basınç, ısı salınım oranı (HRR), maksimum silindir sıcaklığı, tutuşma gecikmesi-yanma süresi ve termik verim-OİB gibi veriler ilk bölümü, CO, EINOx ve HC emisyonları da motor emisyonlarını değişimini içeren ikinci bölümü oluşturmuştur. Elde edilen sayısal sonuçlardan termik verim ve ortalama indike basınç hesaplanmasının Forte’nin kullandığı denklemlere göre belirlenmiştir. Termik verim ve OİB için kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir.

$$\eta_{\text{termik verim}} = \frac{W}{m_{\text{yakıt}} \cdot LHW_{\text{yakıt}}} \quad (1)$$

Burada W işi, $m_{\text{yakıt}}$ yakıtın toplam kütesini ve $LHW_{\text{yakıt}}$ yakıtın alt ısıl değerini ifade etmektedir. OİB denklem 2 ye göre hesaplanmaktadır.

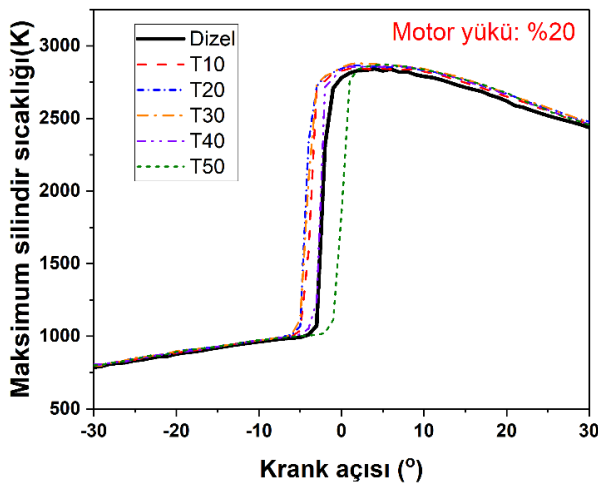
$$OİB = \frac{W}{V_{\text{yer}}} \quad (2)$$

Burada W işi, V_{yer} ise yer değiştirme hacmini ifade etmektedir. V_{yer} , kesit alanı*strok olarak hesaplanmıştır.

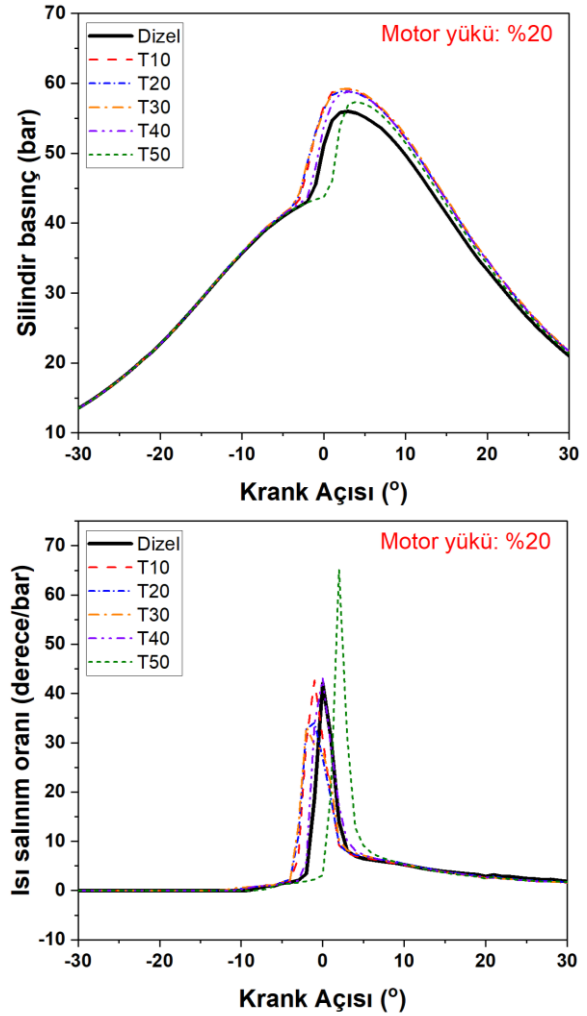
Araştırma Sonuçları ve Tartışma

Şekil 1 farklı oranlarda tolüenin dizele ilave edilmesinin motorun silindir içi basınç ve ısı salınım oranı üzerindeki etkisinin değişimini ifade eden eğriyi göstermektedir. Şekil 1’e göre, tolüen oranının %40’a kadar artırılmasının HRR’de çok büyük bir değişime sebep olmadığı, ancak basınçta artış sağladığı görülmüştür. Özellikle basınç eğrisi

incelendiğinde, dizele eklenen tolüen oranı %30 seviyesine kadar artırıldıkça, basınç ÜÖN'den önce artmaya başlamıştır. Oluşan bu artışın aynı zamanda maksimum basınç artışında da etkili olduğu görülmüştür. Benzer değişim ısı salınım oranı eğrilerinde de görülmüştür. Isı salınım oranı eğrisi incelendiğinde, maksimum HRR değerinin T50 yakıtlı deneyde olduğu gözlenmiştir. Karışım oranının %10'dan %30'a artması ile başlangıçta daha iyi bir yanma sağlanmış [13] ve yanmanın erken başlamasından dolayı basınç ve HRR değeri erken krank açılarındaki artmaya başlamıştır. T40 ve T50 yakıtlı testlerde ise basınç ve HRR değeri daha geç açılarda artmaya başlamış ve bu testlerde oluşan maksimum değerlerin olduğu krank açısı ÜÖN'den sonra ötelenmiştir. Basınçta en yüksek değerin T10 ve T20 yakıtlı testlerde olduğu görülürken, en düşük değerin T50 testinde elde edildiği tespit edilmiştir. Veriler analiz edildiğinde, dizele eklenen tolüenin düşük parlama noktası ve viskozite değerinin basınç değerinin değişiminde etkili olmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. T10, T20 ve T30 yakıtlı testlerde, düşük viskozite ve parlama noktası değerlerinin oldukça etkili olduğu görülmüştür. Parlama noktası, yakıtın bir ateşleme kaynağına maruz kaldığında tutuşacağı en düşük sıcaklık olarak tanımlanmaktadır [14]. Ayrıca, yakıt atomizasyonunun yanmayı etkilediği bilinmektedir [15]. Bu iki veri göz önüne alındığında, yapılan çalışmada düşük viskoziteye sahip tolüenin, daha iyi bir atomizasyon sağlamanın yanında düşük parlama noktasının yanmayı daha erken krank açılarındaki başlamasına sebep olduğu düşünülmektedir. Dolgu içindeki tolüen miktarı arttıkça, yani T40 ve T50 yakıtlı testlerde, basınç değerindeki düşüşün, tolüenin düşük setan ve yüksek oktan sayısından dolayı yanmayı geciktirmesinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Bu yakıtlar için basınçta görülen azalmaya rağmen, en yüksek HRR değerinin T50 yakıtlı testte oluşmasının da yine geç ve aniden başlayan yanmaya bağlı olduğu ve yanmanın kararsızlaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 2. Silindir içi maksimum sıcaklığın tolüen ilavesi ile değişimi

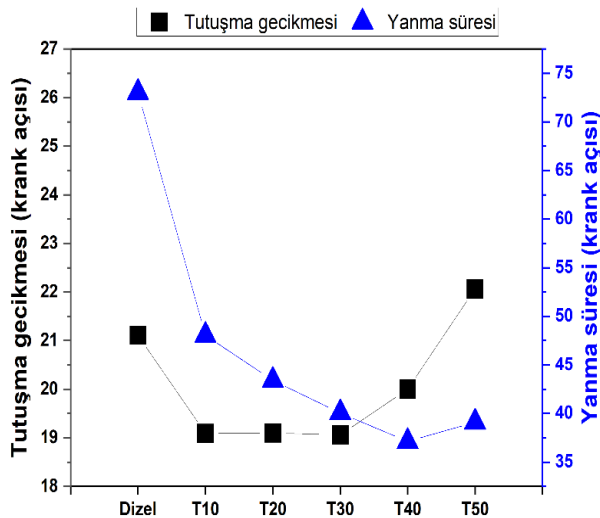


Şekil 1. Silindir içi basınç ve ısı salınım oranının tolüen ilavesi ile değişimi

Şekil 2 farklı oranlarda tolüenin dizele ilave edilmesinin motorun maksimum sıcaklık değeri üzerindeki etkisinin değişimini ifade eden eğriyi göstermektedir. Grafikteki bulgular, silindir içi maksimum sıcaklığın dizele eklenen tolüen ile birlikte ilk olarak kademeli olarak erken krank açılarındaki artmaya başladığını gösterirken, T40 ile birlikte kademeli olarak daha geç krank açılarındaki artış olduğunu ve T50 kullanımında iyice geç başladığını göstermektedir. Yapılan çalışmada, sıcaklık değişimini iki bölümde değerlendirmenin analizler açısından daha etkili olacağı düşünülmektedir. İlk bölümde tolüenin yakıt olarak T10-T30 aralığında kullanımı sonucundaki değişimi incelenmiştir. Bu bölümde özellikle tolüenin dizele eklenmesi ile dolgunun daha düşük viskozite değeri ile silindir içinde daha homojen bir karışım elde edilmiş ve bu sebeple yanmanın iyileşmesi ile sıcaklık değerinde artış meydana gelmiştir. İkinci bölümde ise T40 ve T50 yakıtlarının kullanımı söz konusudur. Bu yakıtlar daha düşük viskoziteye sahip olmalarına rağmen, yüksek oktan ve düşük setan sayısına da sahip olmalarından kaynaklanan daha geç yanma reaksiyonlarına sebep olmuştur. Bu sebeple pistonun hareketinin ÜÖN'den sonra başlayan yanma diğer yakıtların kullanıldığı testlere göre daha az etkili olmuş ve özellikle T50 yakıtı kullanımında sıcaklık değeri daha geç krank açılarındaki artmaya başlamıştır.

Özetle, sıcaklık değerinin kullanılan tolüenli tüm yakıtlar için artış gösterdiği ve en fazla artışın T20-T30 yakıtlı deneylerde olduğu belirlenmiştir. T40 ve T50 yakıtlı testte sıcaklık değeri daha geç krank açılarında artmaya başlamış ve maksimum sıcaklık değeri dizele göre yine de yüksek olmuştur.

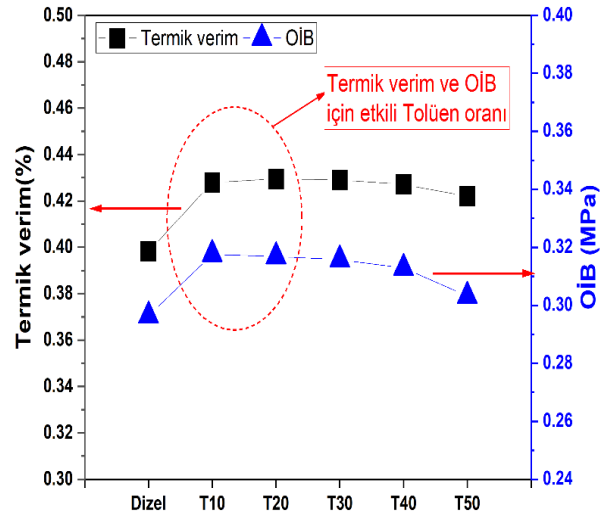
Şekil 3 tutuşma gecikmesi (TG) ve yanma süresinin (YS) dizele ilave edilen tolüen oranına bağlı olarak değişimini gösteren verilerin eğrisini göstermektedir. Veriler T10, T20 ve T30 yakıtlı testlerde tutuşma gecikmesinin neredeyse değişmediğini gösterirken, tolüen oranının artmasıyla T40-T50 yakıtlı testlerde tutuşma gecikmesinin oldukça hızlı bir şekilde uzadığını göstermiştir. Sıkıştırma ateşlemeli motorlarda tutuşma gecikmesinin süresi, daha sonraki motor performansını, yanma süreçlerini ve egzoz kirleticilerini etkileyen çok önemli bir performans parametresi olarak tarif edilmektedir. Ayrıca, tutuşma gecikmesinin yakıtın setan sayısının azalmasıyla doğrusal olmayan bir şekilde arttığı bilinmektedir [15]. Bu bilgiler ışığında, yapılan çalışmada tutuşma gecikmesinin tolüen oranını artışı ile birlikte arttığı, özellikle %40 olarak uygulanmaya başlamasından itibaren artış hızının da arttığı görülmektedir. Bu değişimin literatürde de bildirildiği gibi tolüenin düşük setan ve yüksek oktan sayısından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 3'te yanma süresinin değişimi de verilmiştir. Yanma süresinin tolüen oranı arttıkça kademeli olarak azaldığı, T50 yakıtlı testlerde kısmen artmasına rağmen dizele göre yine de azaldığı görülmüştür. Yanma süresinin, T10 ile birlikte azalmasının iki sebepten kaynaklandığı belirlenmiştir. İlk olarak artan tolüen oranı ile birlikte T10-T40 yakıtlı testlerde yakıt atomizasyonunun daha iyi olduğu ve yanmayı hızlandırdığı düşünülmektedir. T50 yakıtlı testlerde ise tutuşma gecikmesinin uzamasından dolayı hızlıca başlayan yanma sürecinin kısmen artmasına rağmen yine de oldukça az olduğu görülmüştür.



Şekil 3. Tutuşma gecikmesi ve yanma süresinin tolüen ilavesi ile değişimi

Şekil 4 termik verim ve ortalama indike basınç değerinin (OİB) dizele ilave edilen tolüen oranına bağlı olarak

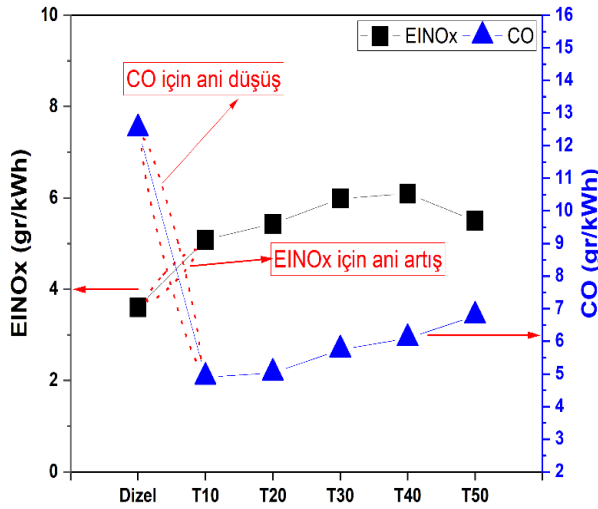
değişimini gösteren verilerin eğrisini göstermektedir. Bulgulara göre, termik verimin tüm yakıt karışımlarının kullanımında dizele kıyasla arttığı gözlenmiştir. Termik verimin artmasında en etkili olan yakıtların sırasıyla T10, T20 ve T30 olduğu görülmektedir. T40 ve T50 yakıtlarının kullanımında termik verimde kısmen azalma olsa da dizele göre artışın devam ettiği belirlenmiştir. Benzer değişim OİB eğrisinde de görülmektedir. Termik verim ve OİB değerlerinin belirlenmesinde daha öncede ifade edildiği gibi denklem 1 ve 2 kullanılmaktadır [11]. Bu denklemlere göre, net işin artması hem termik verim hem de OİB'nin artmasına katkıda bulunmaktadır. Bu bağlamda, T10, T20 ve T30 yakıtlı testlerde daha önceki şekillerde de belirtildiği gibi, dolgunun daha homojen olması sebebiyle hem sıcaklık hem de silindir içi basınç değerleri erken krank açılarında artmaya başlamış, yani tutuşma gecikmesi kısalmıştır. Bu durum yanma reaksiyonlarının pistonun ÜÖN'ye varmadan başlamasını sağlayarak pozitif işin artmasını sağlamıştır. Bunun sonucunda da hem verim hem de OİB verilerinde artış meydana gelmiştir. T40 ve T50 yakıtlı testlerde ise tutuşma gecikmesi uzamış, piston tekrar ÜÖN'den uzaklaşmaya başlamış ve bu durum net işte kısmen azalmaya sebep olmuş olsa da, elde edilen değer dizele kıyasla yine de yüksek kalmıştır. Özet olarak, yapılan çalışmada dizele eklene tolüen oranının %30 oranına kadar artırılmasının hem termik verim hem de OİB'yi etkili biçimde artırdığı görülmüştür. Tolüen oranının artırılarak %40 ve %50 oranında kullanılmasının kısmen verim ve OİB'de azalmaya sebep olmasına rağmen dizele kıyasla artış trendini koruduğu görülmüştür. Tüm bunlar göz önüne alındığında tolüenin dizele %10-30 oranlarında eklenmesinin termik verim ve OİB'yi artırmasının önemli ve umut verici olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 4. Termik verim ve OİB'nin tolüen ilavesi ile değişimi

Şekil 5'te EINOx ve CO emisyonlarının dizele ilave edilen tolüen oranına bağlı olarak değişimini gösteren verilere ait değişim eğrisi görülmektedir. EINOx ifadesi kullanılan sayısal program alt yapısında NOx türlerinin emisyon indeksi olarak tanımlanmaktadır. Grafikler incelendiğinde, NOx emisyonu eklenen tolüen ile tüm testlerde tüm yakıtlar için artmıştır. T10-T40 aralığındaki yakıtların kullanımında

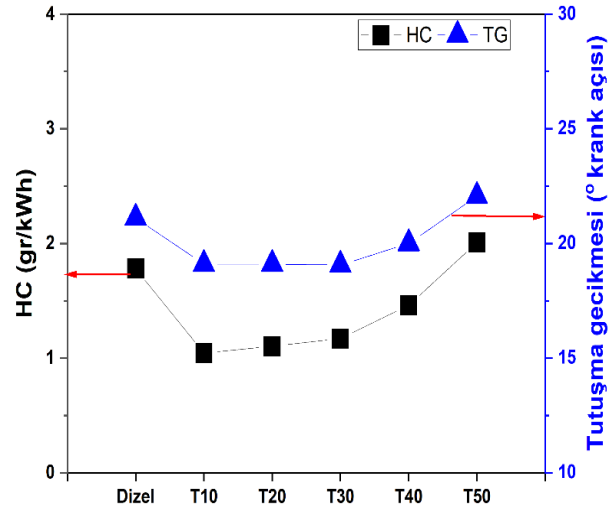
NOx emisyonunda artış meydana gelmiştir. T50 kullanımında T10-T40 yakıtlarına göre azalma meydana gelmesine rağmen bu artış dizel göre hala yüksek seviyededir. Bilindiği gibi NOx emisyonları yanma sıcaklığı ile oldukça bağlantılıdır [16]. Yapılan çalışmada da NOx değişiminin yanma sıcaklığına doğrudan bağlı olduğu görülmüştür. Daha öncede bahsedildiği gibi T10-T30 aralığındaki yakıtların yanmayı iyileştirdiği görülmüştü. Bu durum doğrudan NOx emisyonunda da artış sağlamıştır. Artan verimin yanma sıcaklığındaki etkisinin NOx emisyonunda artışa sebep olduğu değerlendirilmiştir. Tolüen ilavesi ile CO emisyonundaki değişim ise NOx emisyonunun tersine oldukça önemli oranda azalma ile sonuçlanmıştır. Tolüen ilave edilen tüm yakıtların CO emisyonunda dizel göre azalma meydana getirdiği gözlenmiştir. CO emisyonu eksik yanma, kötü atomizasyon ve yanma sıcaklığına doğrudan bağlı olarak oluşmaktadır [17], [18]. Yapılan çalışmada CO emisyonu tolüen ilavesi ile azalan dolgu viskozitesi ile daha iyi bir atomizasyon sağlanmasından dolayı azalmıştır. Tüm veriler değerlendirildiğinde, T10 ve T20 yakıtlarının NOx emisyonunda kısmen artış sağlamasına rağmen, CO emisyonunu azaltmada oldukça başarılı olduğu görülmektedir. Bu sonucun dizel motorlardan düşük yüklerde kaynaklanan kötü yanma koşullarını iyileştirerek CO emisyon kontrolü açısından umut verici olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 5. EINOx ve CO emisyonunun dizel tolüen ilavesi ile değişimi

Şekil 6 HC emisyonunun dizel ilave edilen tolüen oranına ve tutuşma gecikmesine bağlı olarak değişimini gösteren verilere ait değişim eğrisini göstermektedir. Bulgular incelendiğinde, HC emisyonunun T10-T40 yakıtlarının kullanımında azaldığı, T50 kullanımında ise arttığı görülmüştür. HC emisyonunda oluşan değişim tutuşma gecikmesindeki değişimden oldukça etkilendiği görülmüştür. Tutuşma gecikmesinin tolüen ilavesi ile T10-T30 yakıtlarının kullanımında azalmasının daha iyi bir atomizasyon sonucu olduğu ve yanmayı iyileştirdiği daha önce ifade edilmiştir. Bu durum HC emisyonunda da aynı olmuştur. İyileşen yanma ve atomizasyondan dolayı HC emisyonunun azaldığı görülmektedir. T50 kullanımında ise

azalan viskoziteye rağmen, geciken yanmadan dolayı yanma reaksiyonu için zaman yetersiz olmuş ve HC emisyonlarında artış meydana gelmiştir. Literatürde de HC emisyonunun tutuşma gecikmesi ve yanmanın iyileşmesine göre değişim gösterdiği belirtilmektedir [19], [20], [21]. Yapılan çalışmada da bu sonuçların benzer değişime uğradığı görülmüştür. Özetle, tolüen %30 oranına kadar kullanımının tutuşma gecikmesindeki kısılmayla birlikte yanmayı iyileştirdiği ve HC emisyonunu azalttığı görülmektedir. Bu durum HC emisyonunun kontrolü adına önemli olduğu değerlendirilmektedir.



Şekil 6. HC emisyonunun tutuşma gecikmesi ve tolüen ilavesi ile değişimi

Sonuçlar

Yapılan çalışmada dizel motorlarda performansı azalmadan ve herhangi bir tasarım değişimi olmadan emisyonların azaltılması için tolüen dizel yakıtına eklenmiştir. Elde edilen analiz sonuçları yukarıda detaylı olarak sunulmuştur. Aşağıda çalışmanın önemli yönleri belirtilmiştir.

- Sayısal testlerde dizel yerine kullanılan yakıtlar, düşük setan sayısı nedeniyle yanma reaksiyonlarını iyileştirdi. Bu durum basınç ve HRR grafiğinden görülebilmektedir. Özellikle T10, T20, T30 ve T40 yakıtları basınç ve sıcaklıkta artışa sebep oldu.
- T10-T30 aralığındaki yakıtlar tutuşma gecikmesini dizel göre oldukça kısaltırken, T40-T50 aralığındaki yakıtlar tutuşma gecikmesini artırmıştır. Buna karşın tolüenli tüm yakıtlar yanma süresini dizel göre kısaltmıştır.
- Tolüen eklenen tüm yakıtlar OİB ve termik verimde kayda değer bir azalmaya sebep olmadı. Ayrıca, T10-T40 aralığındaki yakıtlar hem OİB hem de termik verim değerini artırmıştır. Bu sonuç motor performansı adına oldukça önemlidir.
- Dizel eklenen tolüen %10-%40 aralığında kullanımı ile CO ve HC emisyonunun kontrolünü sağlamada başarı sağladı. Özellikle T10 kullanımında CO

ve HC emisyonunda %61 ve %41 gibi önemli oranda azalmalar gözlemlendi.

Tüm veriler değerlendirildiğinde, dizele tolüen ilave edilmesinin motor performansı ve emisyonunda önemli sonuçları olduğu görüldü. Özellikle T10-T30 yakıtlarının daha detaylı araştırılmasının dizel motorları inceleyen çalışmalara katkı vermesi beklenmektedir.

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

Makalede yapılan tüm işlemler yazara aittir.

-Çalışma konsepti ve tasarım (M.O.-M.F.)

-Veri toplama (M.O.-M.F.)

-Verilerin analizi ve yorumlanması (M.O.-M.F.)

-Taslağın oluşturulması (M.O.-M.F.)

-Revizyon (M.O.-M.F.)

Teşekkür

-

Kaynaklar

- [1] M. El-Adawy, 'Effects of diesel-biodiesel fuel blends doped with zinc oxide nanoparticles on performance and combustion attributes of a diesel engine', *Alex. Eng. J.*, vol. 80, pp. 269–281, 2023.
- [2] A. Kumar, S. Lahane, C. B. Kumar, I. Mohan, and D. B. Lata, 'Effect of tri-ethylene glycol mono methyl ether and alumina additives on ignition delay in a hydrogen fuelled dual-fuel diesel engine', *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 49, pp. 1123–1132, 2024.
- [3] H. Gürbüz, S. Demirtürk, İ. H. Akçay, and H. Akçay, 'Effect of port injection of ethanol on engine performance, exhaust emissions and environmental factors in a dual-fuel diesel engine', *Energy Environ.*, vol. 32, no. 5, pp. 784–802, Aug. 2021, doi: 10.1177/0958305X20960701.
- [4] F. Akram *et al.*, 'Current trends in biodiesel production technologies and future progressions: A possible displacement of the petro-diesel', *J. Clean. Prod.*, vol. 370, p. 133479, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133479.
- [5] A. F. Emma, S. Alangar, and A. K. Yadav, 'Extraction and characterization of coffee husk biodiesel and investigation of its effect on performance, combustion, and emission characteristics in a diesel engine', *Energy Convers. Manag.*, vol. 14, p. 100214, May 2022, doi: 10.1016/j.ecmx.2022.100214.
- [6] M. Qenawy *et al.*, 'Performance and emission of extracted biodiesel from mixed Jatropha-Castor seeds', *Fuel*, vol. 357, p. 130060, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.fuel.2023.130060.
- [7] M. Okcu, Y. Varol, Ş. Altun, and M. Firat, 'Effects of isopropanol-butanol-ethanol (IBE) on combustion characteristics of a RCCI engine fueled by biodiesel fuel', *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 47, p. 101443, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.101443.
- [8] M. G. Krishnan, S. Rajkumar, J. Thangaraja, and Y. Devarajan, 'Exploring the synergistic potential of higher alcohols and biodiesel in blended and dual fuel combustion modes in diesel engines: A comprehensive review', *Sustain. Chem. Pharm.*, vol. 35, p. 101180, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.scp.2023.101180.
- [9] G. Pullagura *et al.*, 'Enhancing performance characteristics of biodiesel-alcohol/diesel blends with hydrogen and graphene nanoplatelets in a diesel engine', *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 50, pp. 1020–1034, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.09.313.
- [10] C. Lee, Y. Wu, H. Wu, Z. Shi, L. Zhang, and F. Liu, 'The experimental investigation on the impact of toluene addition on low-temperature ignition characteristics of diesel spray', *Fuel*, vol. 254, p. 115580, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2019.05.163.
- [11] A. Forte, '17.0', *ANSYS San Diego*, 2015.
- [12] S. Özer, M. Akçay, and E. Vural, 'Effect of toluene addition to waste cooking oil on combustion characteristics of a CI engine', *Fuel*, vol. 303, p. 121284, 2021.
- [13] P. Kwanchareon, A. Luengnaruemitchai, and S. Jai-In, 'Solubility of a diesel-biodiesel-ethanol blend, its fuel properties, and its emission characteristics from diesel engine', *Fuel*, vol. 86, no. 7, pp. 1053–1061, May 2007, doi: 10.1016/j.fuel.2006.09.034.
- [14] V. D. Chaudhari, A. Kulkarni, and D. Deshmukh, 'Spray characteristics of biofuels for advance combustion engines', *Clean. Eng. Technol.*, vol. 5, p. 100265, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.clet.2021.100265.
- [15] H. Köten and A. S. Parlakyiğit, 'Effects of the diesel engine parameters on the ignition delay', *Fuel*, vol. 216, pp. 23–28, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.fuel.2017.11.136.
- [16] S. Manigandan, J. I. Ryu, T. R. Praveen Kumar, and M. Elgendi, 'Hydrogen and ammonia as a primary fuel – A critical review of production technologies, diesel engine applications, and challenges', *Fuel*, vol. 352, p. 129100, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2023.129100.
- [17] R. N. Bhagat, K. B. Sahu, S. K. Ghadai, and C. B. Kumar, 'A review of performance and emissions of diesel engine operating on dual fuel mode with hydrogen as gaseous fuel', *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 48, no. 70, pp. 27394–27407, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.251.
- [18] S. H. Hosseini *et al.*, 'Use of hydrogen in dual-fuel diesel engines', *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 98, p. 101100, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.pecs.2023.101100.
- [19] A. Tamilvanan *et al.*, 'Effect of diethyl ether and ethanol as an oxygenated additive on Calophyllum inophyllum biodiesel in CI engine', *Environ. Sci.*

- Pollut. Res.*, vol. 28, no. 26, pp. 33880–33898, Jul. 2021, doi: 10.1007/s11356-020-10624-3.
- [20] A. K. Agarwal *et al.*, ‘Effect of fuel injection pressure and injection timing of Karanja biodiesel blends on fuel spray, engine performance, emissions and combustion characteristics’, *Energy Convers. Manag.*, vol. 91, pp. 302–314, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2014.12.004.
- [21] H. K. Suh, S. H. Yoon, and C. S. Lee, ‘Effect of Multiple Injection Strategies on the Spray Atomization and Reduction of Exhaust Emissions in a Compression Ignition Engine Fueled with Dimethyl Ether (DME)’, *Energy Fuels*, vol. 24, no. 2, pp. 1323–1332, Feb. 2010, doi: 10.1021/ef9010143.



Kör delik delmenin alüminyum 5754 ile oluşturulan tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımına etkisi

Effect of blind hole drilling on shear strength of single lap adhesive joints with Aluminum 5754

Ali İŞIKTAŞ^{1*}

¹ Balıkesir Üniversitesi, Edremit MYO, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, ali.isiktas@balikesir.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1532-4465>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 26 Aralık 2023
Revizyon 9 Ocak 2024
Kabul 15 Ocak 2024
Online 29 Mart 2024

Anahtar Kelimeler:

Yapıştırma dayanımı, bağlantı tasarımı, delik delme, yapıştırıcı türü

ÖZ

Bu çalışmada, Alüminyum 5754 ile oluşturulan tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının kayma test sonuçlarına yer verilmiştir. Kör delik delme işleminin yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılar üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla alüminyumların yüzeylerine delikler delinerek farklı tipte bağlantı konfigürasyonları oluşturulmuştur. Bağlantıdaki alüminyum parçalardan biri delikli olduğunda, Araldite® 2015 kullanılan bağlantıların hasar yükünde, her ikisi de deliksiz alüminyumlara göre %39 artış görülmüştür. Araldite® AV138 kullanılan bağlantılardaki hasar yükünde ise artış %54 olmuştur. Bağlantıdaki alüminyumlardan ikisi de delikli olduğunda, Araldite® 2015 kullanılan bağlantılardaki hasar yükünde, her ikisi de deliksiz alüminyumlara göre %98 artış görülmüştür. Araldite® AV138 kullanılan bağlantılardaki hasar yükünde ise artış %165 olmuştur. Ayrıca, Araldite® 2015 kullanılan numunelerin kayma testlerindeki uzama miktarları Araldite® AV 138 kullanılan numunelere göre daha yüksek çıkmıştır.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 26 December 2023
Received in revised form 9 January 2024
Accepted 15 January 2024
Available online 29 March 2024

Keywords:

Adhesive strength, joint design, hole drilling, adhesive type

ABSTRACT

In this study, shear tests results of single lap adhesive joints with Aluminum 5754 are included. To investigate the effect of blind hole drilling on adhesive bonded joints, different types of connection configurations were created by drilling holes in the surfaces of the aluminum. When holes are drilled into one of the aluminum parts in the joint, there was a 39% increase in the failure load of the joints using Araldite® 2015 compared to both without holes aluminum. The increase in the failure load on joints using Araldite® AV138 was 54%. When holes are drilled into both aluminum parts in the joint, there was a 98% increase in the failure load of the joints using Araldite® 2015 compared to both without holes aluminum. The increase in the failure load on joints using Araldite® AV138 was 165%. In addition, the elongation amounts in the shear tests of the samples using Araldite® 2015 were higher than the samples using Araldite® AV 138.

Doi: 10.24012/dumf.1410251

* Sorumlu Yazar

Giriş

Yapıştırma yöntemiyle birleştirme otomotiv, havacılık ve denizcilik gibi yüksek teknolojlili endüstri alanlarında yaygın kullanılmaktadır [1-4]. Yapıştırıcı temelli birleştirme; iki veya daha fazla malzemenin sentetik esaslı bir yapıştırıcı kullanılarak bağlantının çözülemeyecek biçimde birleştirilmesi tekniğidir. Birleştirmede kullanılan malzemeler; metal, polimer, seramik, kompozit ya da bu malzemelerin kombinasyonları olabilir [5, 6]. Yapıştırma yöntemi ile yapılan bağlantıların geleneksel mekanik bağlantı yöntemlerine göre yüksek dayanım, düşük maliyet, montaj kolaylığı ve hafiflik gibi avantajlar sağlamaktadır [7, 8]. Bununla birlikte yapıştırıcı temelli bağlantılar, geleneksel yöntemlerden olan perçin, kaynak ve benzerleri gibi ergime neticesinde kristal yapıda değişikliklere neden olmadığı, gerilme yığılması oluşturmadığı için tercih sebebi olmaktadır. Yapıştırma yönteminin dezavantajları arasında birleştirme öncesi numunelerin yüzey hazırlığının gerekmesi, çevresel koşullara karşı hassasiyet ve kürlenme koşullarına bağlı olarak değişen özellikler sayılabilir.

Yapıştırıcı kullanılarak oluşturulan bağlantılar çalışma esnasında çekme, kesme, soyulma ve darbe gibi farklı türden yüklere maruz kalmaktadır. Yapıştırma yöntemiyle hazırlanan bağlantılarda hasar oluşması veya zayıflaması genellikle bu yüklerin bir veya birkaç türünden kaynaklanmaktadır [9]. Yapıştırılarak oluşturulan bağlantıların kalitesini ve bağlantı mukavemetini tespit etmek için birçok farklı test kullanılmaktadır [10, 11]. Bu testler, yapıştırma bağlantısının maruz kaldığı hasar yük türüne bağlı olarak ortaya çıkan çeşitli gerilmeleri ve hasar modlarını incelemektedir. Gerçekleştirilen testler, bağlantıdaki yapıştırıcı hasarının nasıl başladığını ve zamanla nasıl ilerlediğini belirlemede önemli rol oynamaktadır [12, 13]. Ayrıca, farklı yükler altında bağlantı bölgesinde oluşan gerilim dağılımının tespit edilmesi, optimum bağlantı tasarımını gerçekleştirmede ve yapıştırıcının çalışma yüklerine karşı etkin direncini tahmin etmede önemlidir [14].

Genty vd. [15] yüksek mukavemetli yapıştırıcıların bağlantı performansını tespit etmede hangi test yönteminin kullanılmasının daha uygun olduğunu belirlemek için bir çalışma yaptılar. Bu çalışmada, bir epoksi yapıştırıcı ile alüminyum 2024-T3 kullanarak hazırladıkları bağlantıda kırılmanın başlangıcını belirlemek için hazırlanan numunelere kayma ve üç nokta eğme testleri uygulamışlardır. Kayma ve üç nokta eğme testlerinde hasar başlangıcının yapışma kırılması şeklinde olduğunu belirtmişlerdir.

Literatürde yapıştırma tekniği ile yapılan birleştirmelerde farklı bağlantı türleri bulunmaktadır. Ancak, tek bindirmeli yapıştırmanın diğer bağlantı türlerine göre imalatının kolay olması nedeniyle uygulamada en çok tercih edilen bağlantıdır. Tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarında, birleştirilen malzemenin yüzey formu, bindirme alanı, bağlantı türü ve yapıştırılan bölgenin geometrisi yapışma dayanımını etkileyen parametreler arasında bulunmaktadır [16-18]. Da Silva vd. [19] yapışma yöntemiyle yaptıkları bağlantılarda yapıştırıcı kalınlığının ve malzeme yüzey hazırlığının önemini vurgularken kullandığı sünek, orta ve gevrek yapıştırıcılar ile yaptıkları testlerin neticelerini matematiksel yaklaşım ile modellemiştir. Bakka vd. [20] çeşitli yöntemler kullanarak hazırladıkları farklı yüzey

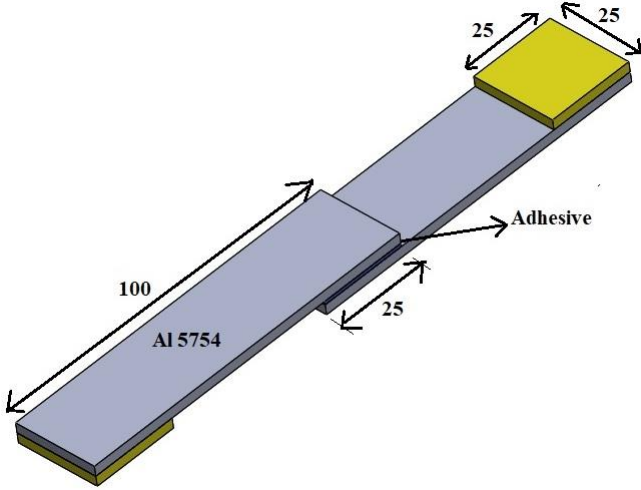
pürüzlülüğündeki titanyum, alüminyum ve paslanmaz çelik malzemelerin, PA 66 kompozit malzemesi ile bir araya getirerek oluşturdukları hibrit yapılı tek bindirmeli yapışma bağlantılarının kayma dayanımları araştırmışlar ve elde ettikleri en yüksek değerdeki kayma dayanımlarını raporlamışlardır. Alfano vd. [21] çalışmalarında paslanmaz çelik ve alüminyumun sadece yüzey temizliğinin yapılması ve farklı parametrelerde lazer işleme ile yüzeylerin modifiye edilmesini incelemiştir. Yapılan testlerin neticesinde, alüminyum yüzeylerine uygulanan lazer işleme ile yapışmanın kısmen iyileştirilebildiği, paslanmaz çelik yüzeylerde ise önemli oranda gelişme sağlandığı görülmüştür. Maressa vd. [22] Ti6Al4 malzemesi üzerinde yaptıkları yüzey deseni çalışmasında, farklı yüzey deformasyon türlerinin yapıştırma bağlantı mukavemetine etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, yarım küre şeklinde çukurlar açılmış, kumlanmış, ızgara formunda işlenmiş ve karma desenli yüzeylerin yapışma dayanımına etkisini araştırmışlardır. Ölçülen pürüzlülük değerlerinde, pürüzlülük sıralamasının azdan çoğa işlenmemiş, kumlanmış, çukurcuklu, ızgara formundaki yüzey ve karmaşık yüzey şeklinde olduğunu belirtmişlerdir. Yapışma mukavemetinin ortalama pürüzlülük değeri ile doğru orantılı olmadığını, ayrıca tüm lazerle işlenen yüzeylerin diğer düz ve kumlanmış yüzeylere göre en az 8 kat daha iyi bağlantı dayanımı oluşturduğunu belirtmişlerdir.

Endüstriyel uygulamalarda, metal malzemelerin yüzeylerine delik delme işlemi farklı biçimlerde uygulanmaktadır. Dolu delik delme ve kör delik delme en çok tercih edilenler arasındadır. Metal malzemelere delik açılması, delik etrafında gerilme yığılmasına yol açarak çentik etkisi oluşturmaktadır. Bu durumu en aza indirmek amacıyla çalışmada alüminyum yüzeylere kör delikler açılarak yapışma alanının artırılması amaçlanmıştır. Yapıştırma yöntemi ile yapılan birleştirmelerde, farklı bağlantı modellerinin kullanılmasıyla yapışma dayanımı değişmektedir. Bu bağlamda Pinto vd. [23] alüminyum alaşımı ile oluşturdukları tek bindirmeli bağlantılarında, farklı modifikasyonlarda boydan boya delik delinmesinin bağlantı mukavemetine etkisini araştırmışlardır. Bindirme bölgesindeki deliklerin simetrik yer değiştirilmesinin bağlantı mukavemetine belirgin bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir. Zielecki vd. [24] tek bindirmeli bağlantılarında kullandıkları S235JR çeliklerin uç kısımlarına açtıkları çentik ve deliklerin yapıştırma dayanımına etkisini incelemiştir. Testlerde, parçaların ön kısmındaki yapıştırıcıyla doldurulan çentiklerin bağlantı mukavemetini önemli ölçüde iyileştirirken, delik çap ve yerlerindeki değişikliklerin bağlantı dayanımı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir.

İleri sürdüğümüz çalışmada, Al 5754 malzemesi ile oluşturulan tek bindirmeli yapışma bağlantılarının kayma dayanımları raporlanmıştır. Alüminyum 5754 kullanılarak hazırlanan tek bindirmeli bağlantılarda, alüminyum yüzeylerine kör delik delmenin yapıştırma dayanımına etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, farklı konfigürasyonlarda oluşturulan bağlantıların dayanımı test edilmiş ve elde edilen deney sonuçları karşılaştırılarak, tek bindirmeli bağlantılarda farklı türde bağlantıların etkisi incelenmiştir.

Materyal ve metot

Bu çalışmada, alüminyum 5754 ile oluşturulan tek bindirmeli bağlantıların birleştirilmesinde Araldite® 2015 ve AV138/HV998 epoksi yapıştırıcılar kullanılmıştır. Alüminyum 5754, yüksek mukavemet ve korozyon direncinin yanı sıra mükemmel darbe ve aşınma direncine sahip temperlenmiş bir alüminyum alaşımıdır. Al 5754 ile oluşturulan tek bindirmeli yapıştırma bağlantısındaki numune ölçüleri Şekil 1’de gösterilmektedir.



Şekil 1. Tek bindirmeli bağlantı geometrisi

Numunelerin hazırlaması sürecinde ilk olarak, 3 mm kalınlığındaki alüminyum 5754 levhalar giyotin tezgâh kullanılarak 25x100 mm ölçülerine kesilmiştir. Deneylerde kullanılan alüminyum numunelerin mekanik özellikleri Tablo 1’de, kimyasal bileşimi Tablo 2’de verilmiştir. Tek bindirme bağlantılarının oluşturulmasında kullanılan Araldite® 2015 ve AV138/HV998 epoksi yapıştırıcıların mekanik özellikleri Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 1. Alüminyum 5754-H111 mekanik özellikleri

Çekme dayanımı (MPa)	Akma dayanımı (MPa)	Birim uzama (%)
212.9	135.2	15

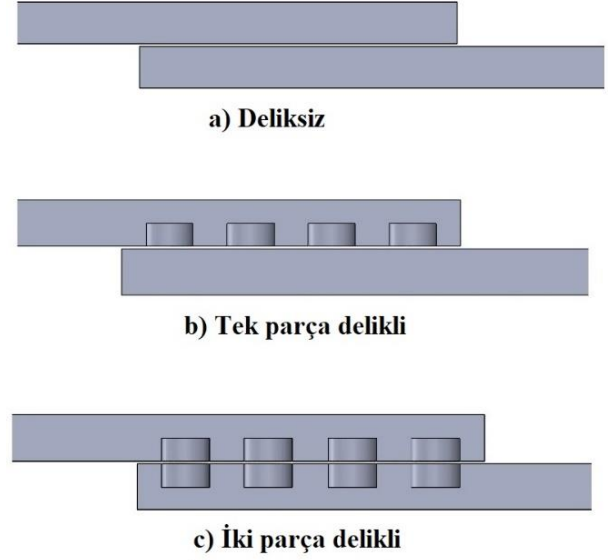
Tablo 2. Alüminyum 5754-H111 kimyasal bileşimi

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr
0.201	0.235	0.036	0.200	2.807	0.027	0.021	0.025

Tablo 3. Yapıştırıcıların (Araldite® AV138 ve 2015) mekanik özellikleri [25]

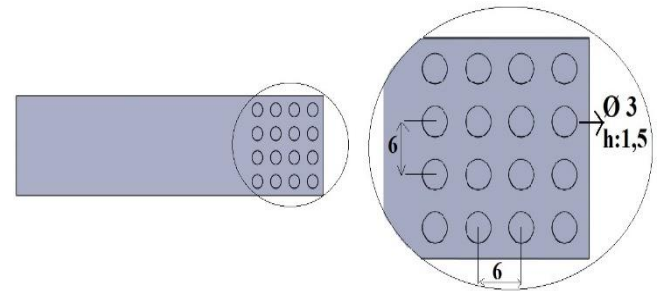
Özellik	AV138	Araldite® 2015
Elastiklik modülü E (GPa)	4.89 ± 0.81	1.85±0.21
Poisson oranı ν	0.35	0.33
Çekme dayanımı σf (MPa)	39.45 ± 3.18	21.63 ±1.61
Kayma modülü G (GPa)	1.81	0.70

Kör delik delme işleminin yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılar üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla alüminyum parçaların bindirme yüzeylerine sabit çapta delik delme işlemi uygulanmıştır. Şekil 2’de gösterildiği gibi üç farklı tipte bağlantı konfigürasyonu oluşturulmuştur.



Şekil 2. Farklı konfigürasyonlara sahip bağlantıların şematik görünümü

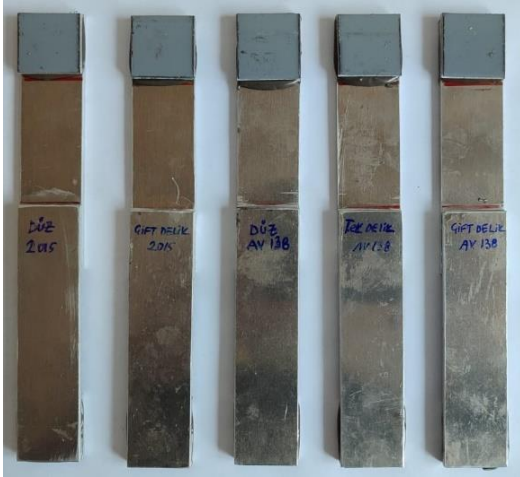
Cnc freze tezgâhı kullanılarak alüminyum plakaların tek bir yüzeyine 3 mm çapında 16 adet kör delik delinmiştir (Şekil 3). Delme işlemlerinde, ilk önce 2.8 mm matkap daha sonra 3 mm çapında rayba kullanılmıştır. Deliklerin derinliği 1.5 mm yani yapıştırılan alüminyum malzeme kalınlığının yarısı kadardır. Bağlantılarda iyi bir yapışma elde etmek için parçalar delme işleminden sonra temizlenmiştir.



Şekil 3. Alüminyum yüzeyindeki delik ölçüleri

Alüminyum numune yüzeyleri yapıştırma işlemi öncesi P120 numaralı silikon karbid zımpara kâğıdı ile pürüzlendirilmiştir. Zımparalama işlemlerinde, alüminyum yüzeylerinde biriken metal partikülleri temizlemek için yüzey temizleyici solvent kullanılmıştır. Zımparalama işlemi sonrası numunelerin pürüzlülük ölçümü yapılmış ve Ra:1,3 ± 0.1 µm olarak belirlenmiştir.

Tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarında, birleştirilen alüminyum plakalar arasındaki yapıştırıcı kalınlığının tüm numunelerde eşit olması deney sonuçlarının doğru analiz edilmesinde önem arz etmektedir. Bu amaçla, alüminyum plaka yüzeylerine eşit kalınlıkta yapıştırıcı uygulanabilmesi için kalıp kullanılmıştır. Tek bindirmeli bağlantılarda, alüminyum plakalar Araldite® 2015 ve AV138 epoksi yapıştırıcıları kullanılarak birleştirilmiştir. Her iki yapıştırıcı da oda sıcaklığında kürleşebilen iki bileşenli bir yapısal yapıştırıcıdır. İki bileşenli yapıştırıcılardan Araldite® 2015 ağırlıkça 1/1 oranında, AV138 ise 4/10 (sertleştirici/yapıştırıcı) oranında homojen bir karışım elde edilene kadar karıştırılmıştır. Hazırlanan yapıştırıcı karışımları alüminyum yüzeylerine bir tabaka şeklinde uygulanmıştır. Yapıştırma işlemi sonrası plakalar kalıba yerleştirilmiş ve sabit basınç altında oda sıcaklığında 24 saat kürleşmeye bırakılmıştır. Kullanılan yapıştırma kalıbı sayesinde, tüm tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarında alüminyumlar arası 0.2 mm kalınlığında yapıştırıcı elde edilmiştir. Son adım olarak, numunelerin çekme cihazındaki çenelere aynı ekseninde bağlanabilmesi için tablolar 25x25 mm ölçülerinde kesilip numunelere yapıştırılmıştır. Birleştirme işlemi sonrası hazırlanan numuneler Şekil 4'te verilmektedir.



Şekil 4. Yapıştırma işlemi sonrası numuneler

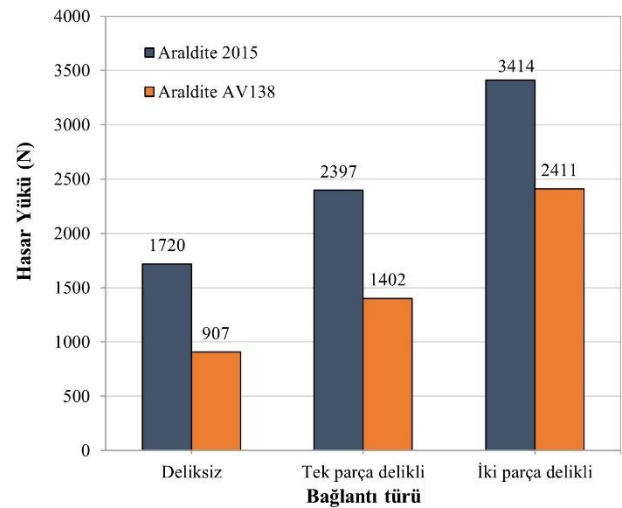
Hazırlanan tek bindirmeli yapıştırma bağlantı numunelerine Şekil 5'te gösterildiği gibi eksenel yönde kayma testleri uygulanmıştır. Tek bindirme bağlantılarının kayma testleri ASTM D5868-01 standartları uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Kayma testleri oda sıcaklığında 1 mm/dk yükleme hızında Zwick Roell Z020 test cihazında gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinin görüntüsü Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5. Tek bindirmeli bağlantıların kayma testi

Bulgular ve Tartışma

Alüminyum 5754 ile oluşturulan tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarında kör delik delmenin yapıştırma dayanımına etkisini araştırmak amacıyla eksenel yönde kayma testleri yapılmıştır. Tek bindirmeli bağlantıların oluşturulmasında Araldite® 2015 ve AV138 epoksi yapıştırıcıları kullanılmış ve hasar yükleri grafikler üzerinde karşılaştırılmıştır. Alüminyum 5754 ile oluşturulan tek bindirmeli bağlantılarda, yüzeye kör delik uygulanmasının yapışma dayanımına etkisi Şekil 6'daki grafikte gösterilmiştir.



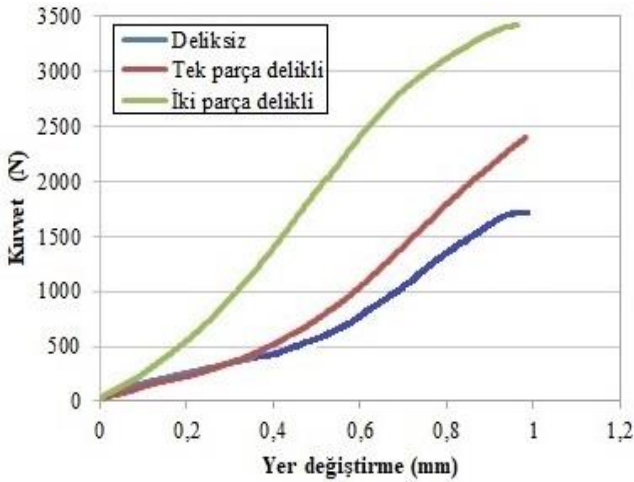
Şekil 6. Tek bindirmeli bağlantılarda kör delik uygulamasının yapışma dayanımına etkisi

Bağlantıdaki alüminyumlar deliksiz olduğunda, Araldite® 2015 ve AV138 yapıştırıcı kullanıldığında hasar yükleri sırası ile 1720 N ve 907 N çıkmaktadır. Bağlantıdaki alüminyumlardan biri delikli olduğunda, 3 mm çapındaki kör

delikler yapıştırma alanının artmasını sağlamaktadır. Alüminyum yüzey alanındaki bu artış, Araldite® 2015 kullanılan bağlantılardaki hasar yükünü 1720 N'dan 2397 N'a çıkararak %39 daha yüksek dayanım elde edilmesini sağlamıştır. Araldite® AV138 kullanılan bağlantılardaki hasar yükü ise 907 N'dan 1402 N'a çıkararak %54 artış olmuştur (Şekil 6).

Bağlantıdaki alüminyumlardan ikisi de delikli olduğunda, 3 mm çapındaki kör delikler yapıştırma alanının daha fazla artmasını sağlamaktadır. Alüminyum yüzey alanındaki bu artış, Araldite® 2015 kullanılan bağlantılardaki hasar yükünü 1720 N'dan 3414 N'a çıkararak %98 daha yüksek dayanım elde edilmesini sağlamıştır. Araldite® AV138 kullanılan bağlantılardaki hasar yükü ise 907 N'dan 2411 N'a çıkararak %165 artış olmuştur (Şekil 6). Bu durum, tek bindirmeli bağlantılarda bindirme bölgesindeki yapıştırıcının temas ettiği alanın artmasıyla yapışma mukavemetinin artması olarak açıklanabilir. Deliksiz, tek parça delikli ve iki parça delikli olarak hazırlanan bağlantıların kayma testlerinde, Araldite® 2015 sağladığı bağlantı mukavemeti ile Araldite® AV 138'e göre daha yüksek kayma dayanımına sahiptir.

Araldite® 2015 yapıştırıcıyla hazırlanan tek bindirmeli yapıştırma bağlantıların kayma test sonuçlarından elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği Şekil 7'de verilmektedir.

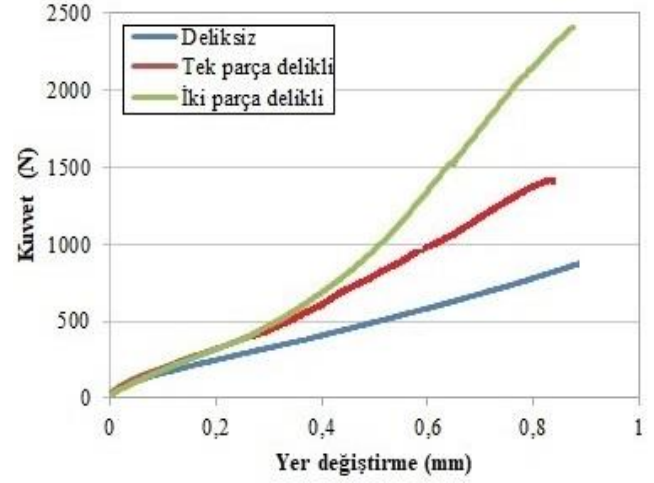


Şekil 7. Araldite® 2015 yapıştırıcı ile hazırlanan bağlantıların kuvvet-yer değiştirme grafiği

Şekil 7'de Alüminyum 5754 ile oluşturulan tek bindirmeli bağlantılarda Araldite® 2015 yapıştırıcı ile hazırlanan bağlantıların kuvvet yer değiştirme eğrileri incelendiğinde, bağlantı türleri sırasıyla deliksiz, tek parça delikli ve iki parça delikli olarak değişmesiyle, yapıştırma bağlantılarının kuvvet değeri artmaktadır. Literatürdeki yapıştırma yöntemiyle yapılan birleştirmelerde, yapıştırma alanının artırması ile bağlantı dayanımında gelişme olduğu belirtilmektedir [22, 23]. Grafikte, kuvvet-yer değiştirme eğrisinin alt kısmında kalan alan, yapıştırma bağlantısının emilen enerjisini temsil etmektedir. Buna göre, her iki parçanın delikli olduğu bağlantılarda emilen enerji, diğer deliksiz ve tek delikli bağlantılarda emilen enerjiden daha yüksek olduğu söylenebilir. Araldite® 2015 sünek bir yapıştırıcı olduğu için

kuvvet-yer değiştirme grafiğinde uzama değeri, Araldite® AV 138'e göre daha yüksektir.

Araldite® AV138 yapıştırıcıyla hazırlanan tek bindirmeli yapıştırma bağlantıların kayma test sonuçlarından elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği Şekil 8'de verilmektedir.



Şekil 8. Araldite® AV138 yapıştırıcı ile hazırlanan bağlantıların kuvvet-yer değiştirme grafiği

Şekil 8'de Alüminyum 5754 ile oluşturulan tek bindirmeli bağlantılarda Araldite® AV138 yapıştırıcı ile hazırlanan bağlantıların kuvvet yer değiştirme eğrileri incelendiğinde, bağlantı türleri sırasıyla deliksiz, tek parça delikli ve iki parça delikli olarak değişmesiyle, yapıştırma bağlantılarının yük taşıma kapasitesi artmaktadır. Araldite® AV 138 kırılğan bir yapıştırıcı olduğu için kuvvet-yer değiştirme grafiğinde uzama miktarı, Araldite® 2015'e göre daha düşüktür.

Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında Alüminyum 5754 ile oluşturulan tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarında, farklı yapıştırıcı kullanılması ve kör delik uygulamasının yapışma dayanımına etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre:

- Alüminyum 5754 ile oluşturulan tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarında, yapıştırıcı türünün değişmesi ve yüzeylere kör delik uygulamasının yapılması yapışma dayanımına önemli oranda etki etmektedir.
- Araldite® 2015 kullanılan bağlantıdaki alüminyumlar deliksiz olduğunda, hasar yükü 1720 N çıkmaktadır. Bağlantıdaki alüminyumlardan biri delikli olduğunda, hasar yükü 2397 N'a çıkararak %39 daha yüksek dayanım elde edilmiştir. Alüminyumların ikisi de delikli olduğunda ise hasar yükü 3414 N'a çıkararak %98 artış meydana gelmiştir.
- Araldite® AV 138 kullanılan bağlantıdaki alüminyumlar deliksiz olduğunda, hasar yükü 907 N çıkmaktadır. Bağlantıdaki alüminyumlardan biri delikli olduğunda, hasar yükü 1402 N'a çıkararak %54 daha yüksek dayanım elde edilmiştir. Alüminyumların ikisi

de delikli olduğunda ise hasar yükü 2411 N'a çıkararak %165 artış meydana gelmiştir.

- Deliksiz, tek parça delikli ve iki parça delikli olarak hazırlanan bağlantıların kayma testlerinde, Araldite® 2015 kullanılan numunelerin kayma dayanımı Araldite® AV 138'e göre daha yüksek çıkmıştır.
- Araldite® 2015 kullanılan numunelerin kayma testlerindeki uzama miktarları Araldite® AV 138 kullanılan numunelere göre daha yüksek çıkmıştır.
- Tek bindirmeli bağlantılarda, delikler yapıştırıcı ile doldurulmuş olup bu durum hafif gerilimli bu bölgede yapıştırıcının ankraj etkisini arttırmaktadır.
- Farklı yapıştırıcı ve bağlantı türlerindeki kayma testlerinde, tüm numuneler bağlantının yapıldığı yapışma bölgesinden hasar alarak kopmuştur.

Teşekkür

Bu çalışma Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince desteklenmiştir. Proje numarası: 2023/90.

Kaynaklar

- [1] M. Soleymani, M. Tahani, and P. Zamani, "On the influence of resin pocket area on the failure of tapered sandwich composites," *Advances in Structural Engineering*, vol. 24, no. 1, pp. 42-51, 2021.
- [2] R. M. Nejad, D. G. Moghadam, M. Hadi, P. Zamani, and F. Berto, "An investigation on static and fatigue life evaluation of grooved adhesively bonded T-joints," *Structures*, vol. 35, pp. 340-349, 2022.
- [3] D. Rosendo, G. Viana, R. Carbas, E. Marques, and L. Da Silva, "Effect of temperature and moisture on the impact behaviour of adhesive joints for the automotive industry," *Journal of Applied and Computational Mechanics*, vol. 7, no. 3, pp. 1488-1500, 2021.
- [4] J. Kupski and S. T. De Freitas, "Design of adhesively bonded lap joints with laminated CFRP adherends: review, challenges and new opportunities for aerospace structures," *Composite Structures*, vol. 268, p. 113923, 2021.
- [5] D. Shore, J. Wilson, A. Matthews, A. Yerokhin, "Adhesive bond strength of PEO coated AA6060-T6," *Surface and Coatings Technology*, vol. 428, p. 127898, 2021.
- [6] B. Nečasová, P. Liška, and J. Šlanhof, "Analysis of temperature effect on deformation behaviour and bond strength of adhesive joints with steel and composite substrates," In *Industrial Applications of Adhesives: 1st International Conference on Industrial Applications of Adhesives*, 2021, pp. 107-125.
- [7] M. D. Banea, L. Da Silva, and R. D. Campilho, "The effect of adhesive thickness on the mechanical behavior of a structural polyurethane adhesive," *The Journal of Adhesion*, vol. 91, no. 5, pp. 331-346, 2015.
- [8] A. Tutunchi, R. Kamali, and A. Kianvash, "Adhesive strength of steel-epoxy composite joints bonded with structural acrylic adhesives filled with silica nanoparticles," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 29, no. 3, pp. 195-206, 2015.
- [9] L. Sun, C. Li, Y. Tie, Y. Hou, and Y. Duan, "Experimental and numerical investigations of adhesively bonded CFRP single-lap joints subjected to tensile loads," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 95, p. 102402, 2019.
- [10] S. Bayramoglu, K. Demir, and S. Akpinar, "Investigation of internal step and metal part reinforcement on joint strength in the adhesively bonded joint: Experimental and numerical analysis," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 108, p. 102613, 2020.
- [11] K. Gültekin, S. Akpinar, A. Özel, and G. A. Öner, "Effects of unbalance on the adhesively bonded composites-aluminium joints," *The Journal of Adhesion*, vol. 93, no. 9, pp. 674-687, 2017.
- [12] J.B. Sauvage et al., "Using the 3-point bending method to study failure initiation in epoxide-aluminum joints," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 75, pp. 181-189, 2017.
- [13] E. Ç. Kavdir and M. D. Aydin, "The experimental and numerical study on the mechanical behaviours of adhesively bonded joints," *Composites Part B: Engineering*, vol. 184, p. 107725, 2020.
- [14] Ş. Çitil, "Experimental and Numerical Investigation of Adhesively Bonded Curved Lap Joints under Three-Point Bending," *Mechanics*, vol. 24, no. 6, 2018.
- [15] S. Genty, J.B. Sauvage, P. Tingaut, and M. Aufray, "Experimental and statistical study of three adherence tests for an epoxy-amine/aluminum alloy system: Pull-Off, Single Lap Joint and Three-Point Bending tests," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 79, pp. 50-58, 2017.
- [16] F. Kadioglu, E. Avil, M. E. Ercan, and T. Aydogan, "Effects of different overlap lengths and composite adherend thicknesses on the performance of adhesively-bonded joints under tensile and bending loadings," In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 369, no. 1, p. 012034.
- [17] F. Zou, J. Dang, T. Chen, Q. An, and M. Chen, "Evaluation of typical hole-making strategies on mechanical behavior of CFRP/Ti single-lap bolted joints," *Composite Structures*, vol. 305, p. 116511, 2023.
- [18] F. Gamdani, R. Boukhili, and A. Vadean, "Tensile strength of open-hole, pin-loaded and multi-bolted single-lap joints in woven composite plates," *Materials & Design*, vol. 88, pp. 702-712, 2015.
- [19] L. F. Da Silva, G. Critchlow, and M. A. Figueiredo, "Parametric study of adhesively bonded single lap joints by the taguchi method," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 22, no. 13, pp. 1477-1494, 2008.
- [20] M. Bakkal, H. Osmanoğlu, and M. S. Bodur, "Effect of surface treatments on the interfacial strength for

metal/composite hybrid joints," *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University.*, vol. 37, no. 2, pp. 1033-1046, 2022.

[21] M. Alfano et al., "Surface patterning of metal substrates through low power laser ablation for enhanced adhesive bonding," *The Journal of Adhesion.*, vol. 90, no. 5-6, pp. 384-400, 2014.

[22] P. Maressa, L. Anodio, A. Bernasconi, and A. G. Demir, "Effect of surface texture on the adhesion performance of laser treated Ti6Al4V alloy," *The journal of adhesion.*, vol. 91, no. 7, pp. 518-537, 2015.

[23] A. Pinto, R. Campilho, I. R. Mendes, S. Aires, and A. Baptista, "Effect of hole drilling at the overlap on the

strength of single-lap joints," *International Journal of Adhesion and Adhesives.*, vol. 31, no. 5, pp. 380-387, 2011.

[24] W. Zielecki, K. Łabno, R. Perłowski, Ł. Bąk, and T. Katrňák, "Experimental Research on the Influence of Structural Modifications of Adherends on the Load-Bearing Capacity of Lap Joints of S235JR Steel Sheets," *Advances in Mechanical and Materials Engineering.*, vol. 40, no. 1, pp. 5-13, 2023.

[25] N. G. Barbosa., R. D. Campillo, F. J Silva, and R. D. Moreira "Comparison of different adhesively-bonded joint types for mechanical structures," *Applied Adhesion Science.*, vol. 6, no. 15, pp. 1-19, 2018.



Havuzdere, Geyikdere, İnebeyli ve Tepeköy (Karamürsel, Yalova, Türkiye) Civarındaki Zeolitik Tüflerin Mineralojik ve Petrografik Özellikleri

Mineralogical and Petrographic Characteristic of Zeolitic Tuffs from Havuzdere, Geyikdere, İnebeyli and Tepeköy (Karamürsel, Yalova, Turkey)

Mustafa ALBAYRAK ¹, Asuman KAHYA ^{2*}

¹Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, 06800, Ankara, Türkiye, mustafa_albayrak@hotmail.com.Orcid No: 0000-0002-1691-3387

²Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, 06800, Ankara, Türkiye, asuman27@gmail.com, Orcid No:0000-0002-6728-2140

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 4Ağustos 2023
Revizyon 9 Ocak 2024
Kabul 25 Ocak 2024
Online 29 Mart 2024

Anahtar Kelimeler:

Höylandit, Karamürsel,
Klinoptilolit, Tüf, Yalova, Zeolitler

ÖZ

Bu çalışmada, İzmit körfezinin güneyinde, Karamürsel (İzmit) civarında yer alan Tepeköy, İnebeyli, Havuzdere ve Geyikdere civarındaki Alt-Orta Eosen yaşlı volkanoklastik malzemede, zeolitik tüflerin, mineralojik ve petrografik özellikleri, polarizan mikroskop, X-ışını difraktometre (XRD) ve SEM+EDS analiz yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. XRD sonuçlarına göre zeolit oluşumları vitrik tüflerde gözlenmiştir. Vitrik tüflerin modal mineralojik bileşimi volkan camı (%90), kristaller (%8), opak ve FeO'leşmiş mineral (%2) olarak belirlenmiştir. Kristaller başlıca feldispat, kuvars, biyotit mineralleridir. Volkan camı yaygın olarak volkan camı kıymıkları ve matriksden oluşmaktadır. Zeolitlenme vitrik tüflerdeki volkan camlarının alterasyonu sonucu oluşmaktadır. XRD çalışmalarına göre Tepeköy, İnebeyli köyü ve Havuzdere köyü'nde zeolit minerali klinoptilolit şeklinde oluşurken Geyikdere köyü'nde ise höylandit şeklinde oluşmaktadır.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 4August 2023
Received in revised form 9 January 2024
Accepted 25 January 2024
Available online 29 March 2024

Keywords:

Heulandite, Karamürsel,
Klinoptilolite, Tuff, Yalova, Zeolite

ABSTRACT

In this study, it was carried out in the zeolitic tuffs of Lower-Middle Eocene aged volcanoclastic material in the Tepeköy, İnebeyli, Havuzdere and Geyikdere located in the vicinity of Karamürsel-İzmit, in the south of the Gulf of İzmit. Mineralogical and petrographic properties of zeolitic tuffs were investigated by polarizing microscope, X-ray diffractometry (XRD) and SEM+EDS analysis methods. According to XRD results, zeolite formations were observed in vitric tuffs. The modal mineralogical composition of the vitric tuffs was determined as volcanic glass (90%), crystals (8%), opaque and FeO-oxide minerals (2%). Crystals are mainly feldspar, quartz, biotite minerals. Volcanic glass is commonly composed of volcanic glass shards and a matrix. Zeolitization occurs as a result of alteration of volcanic glasses in vitric tuffs. According to XRD studies, zeolite mineral is formed as clinoptilolite in Tepeköy, İnebeyli and Havuzdere village, while in Geyikdere village it occurs as heulandite.

Doi: 10.24012/dumf.1337941

* Sorumlu Yazar

Giriş

Yalova-Karamürsel (İzmit) arasında yer alan çalışma alanı, Türkiye'nin KB'sında Armutlu yarımadası üzerinde bulunmaktadır. Bu bölge Armutlu-Ovacık Zonu [1]-[4] olarak tanımlanmıştır. Bu zon, İstanbul Zonu ile Sakarya Zonu arasında yer almaktadır.

Bu çalışma ile Armutlu-Ovacık Zonu [5], [6] içerisinde yüzeyleyen Alt-Orta Eosen yaşlı tüflerdeki zeolit oluşumları incelenmiştir. Zeolitler, gözenekli bir yapıya sahip alkali veya toprak alkali elementlerin (Na, K, Mg, Ca) hidratlanmış bir alüminosilikat grubudur. Zeolitleri içeren ana kayac türü zeolitik volkanik tüftür. Birçok volkanik kül çökelinin diyajenetik alterasyonu ile zeolitler oluşur [7]. Zeolitik tuf, genellikle çeşitli kayac türlerinin düşük sıcaklık alterasyonu sonucu oluşur, ancak genellikle ağırlıklı olarak volkanik ve sedimanter kayacalarda oluşur [8]. Zeolitler, volkanik cam, kristal olmayan ve kristalin killer, feldispat, feldispatoid ve hatta zeolitin kendisi gibi birçok ilksel mineral türünden oluşur [9]. Sonuç olarak, vitritik volkanoklastik kayacalar, zeolitlerin hem ilksel hem de ana kayacaları olarak önemlidir. Volkanoklastik cam parçaları doğal zeolitlenme için uygun başlangıç malzemesidir. Zeolitik tufün heterojenliğini etkileyen başlıca faktörler: zeolitik tufün oluşum sürecindeki jeolojik ortam, fizikokimyasal koşullar ile kuvars, feldispat, mika, kil mineralleri gibi minerallerin varlığıdır [9]. Genel olarak zeolitler, zeolit mineralleri içeren alüminyum ve silis açısından zengin volkanik camlarla, volkanik veya alüminosilikat içeren malzemelerin çözünme (dissolution)-çökme (precipitation) gibi süreçleri de içeren, fizikokimyasal reaksiyonlarla oluşur [10]. Dünya çapında yaygın zeolit oluşumları, gösel (lacustrin) sedimanları ile ya da volkanik kayaclardaki vitritik-klastik tüfler ile veya hidrotermal olarak altere olmuş vitrofirler-vitritik klastik tüfler ile arakatmanlı kül-çökeline yer alan tüflerdeki asit-ortaç volkanik camlardan oluşur [10]. Klinoptilolit kristalleşmesi, yaygın olarak, yüksek silisli tüflü kayaclardaki volkanik camın, çökme (depositional) sonrası diyajenez sırasında, devitrikasyon reaksiyonları ile yer değiştirmesiyle (replaced) ortaya çıkar [11]. Höylandit grubu minerallerini oluşturan höylandit-klinoptilolit diyajenetik olarak altere olmuş piroklastik kayacalarda bol miktarda bulunur, özellikle riyolit-riyodasit tüflerinde, hidratlı cam kıymıklarının, patlama sonrası reaksiyonları ile oluşur [12], [13]. Sheppard [14], Doğal zeolit yataklarının oluşumunu, ortamlarına göre altı gruba ayırmıştır: (1) hidrolojik olarak kapalı (tuzlu/alkali) sistemler, (2) açık (tatlı su/yer altı suyu) sistemler, (3) gömülme diyajenez/metamorfizma sırasında, (4) hidrotermal aktivite ile, (5) derin deniz ortamlarında, ve (6) toprakların ayrışmasıyla (weathering). Zeolit mineralleri oluşum

ortamına göre farklılık gösterebilmektedir. Fillipsit, klinoptilolit, höylandit ve erionit yatakları tuzlu-alkali göller, gömülü diyajenetik ortamlarda ve derin deniz sedimanlarında yaygın olarak oluşur. Mordenit bu ortamlarda nadiren oluşur [12]. Buna karşılık, mordenit yaygın olarak jeotermal alanlarda alterasyon minerali olarak oluşur ve oluşum sıcaklığı ~60 ila 160 °C arasında değiştiği bilinmektedir [15]. Sedimanter zeolit oluşumları ve yatakları Türkiye'de yaygın olarak Orta ve Batı Anadolu görülmektedir (Şekil 1). Bu yataklar başlıca Beypazarı [16] - [18], Yozgat [19], Nevşehir (Kapadokya) [20], Kırka [21], Emet [22], [23], Şile [24], Bigadiç, [25]- [27], Gördes [28]- [33] ve Keşan [34] olarak verilebilir. Bu zeolit oluşumları ve içerdiği mineraller Tablo 1'de gösterilmiştir. Bu yataklar içinde Şile hariç, volkanik malzemenin gösel ortamda çökmesiyle oluşmuştur [35]. Tüm bu yataklar içinde Şile hariç, en yaygın zeolit mineralleri klinoptilolit, höylandit ve analsimdir. Mordenit daha az yaygın mineraldir ve sadece Şile bölgesinde tesbit edilmiştir [35]. Türkiye'deki zeolit oluşumları ve potansiyel zeolitik tuf alanları Tablo 1'de verilmiştir [37].

Bu çalışma kapsamında İzmit körfezinin güneyinde, Karamürsel civarında yer alan Tepeköy, İnebeyli, Havuzdere ve Geyikdere'de yüzeyleyen Alt-Orta Eosen yaşlı volkanoklastik malzemedeki, zeolitik tüflerle ilgili detaylı çalışma yapılarak bu tüflerin, mineralojik-petrografik özellikleri ile oluşum ortamı belirlenmeye çalışılmıştır.

Materyal ve Metot

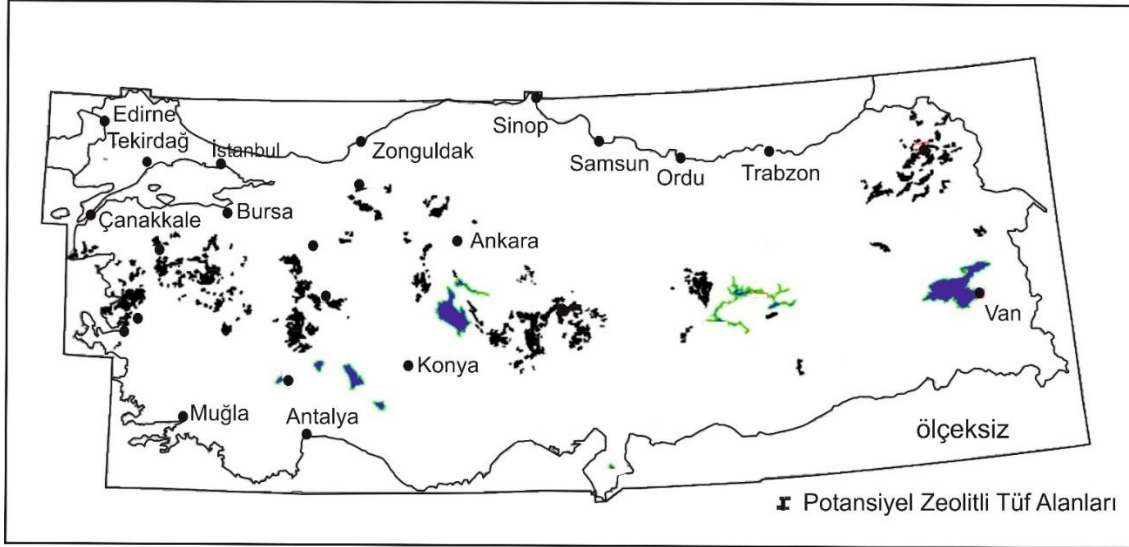
Saha çalışmalarından derlenen toplam 13 örnek üzerinde analizler yapılmıştır. Çalışma alanından derlenen örneklerde klinoptilolit ve höylandit mineral tanımlaması XRD yöntemi ile belirlenmiştir. 12 örneğin X-Ray difraksiyon (XRD) çalışmaları, örneklerin mineralojik içeriklerinin belirlenmesi amacıyla MTA X - Işınları Laboratuvarı'nda Panalytical Expert Powder ve Bruker D8 Advance XRD cihazları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çekimler 2-70° aralığında, scanspeed 0,1 sec/step, increment 0,039155 dir. Kalitatif analizler ICDD kartları ile karşılaştırma yapılarak ve High Score Plus Programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her analiz için 100 µ altına kadar öğütülmüş en az 10 gram numune gerekmektedir ve öğütme işlemi de MTA'nin kırma, öğütme, eleme ünitesinde gerçekleştirilmiştir. Yine ince kesitler MTA İnce ve parlak kesit laboratuvarında yaptırılmıştır. Bu kesitlerde mineral parajenezi, mineral ilişkileri, dokusal özellikler vb. özelliklerin saptanması amacıyla, MTA Mineraloji-Petrografi Araştırmaları Koordinatörlüğü'nde (Analiz Laboratuvarı'nda), Leica DM 2700 P alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop ile incelenmiş ve fotoğraflanmıştır. Ayrıca 4 adet vitritik tuf örneğinin SEM+EDS analizleri

MTA Mineraloji ve Petrografi Laboratuvarında, FEI Inspect F50 FEG-SEM cihazı ile yaptırılmıştır.

Bölgesel Jeoloji

Çalışma alanı Armutlu Yarımadasında, İzmit Körfezinin güneyinde Yalova-Karamürsel arasında yer almaktadır (Şekil 2). Kuzeybatı (KB) Anadolu'da yer alan Armutlu Yarımadası Lavrasya kıtasının güney kenarını temsil etmekte olup, İstanbul Zonu'nun güneyinde yer alan

tektonik birimlerden biri olan Armutlu-Ovacık Zonu içerisinde kalmaktadır (Şekil 2) [5], [6]. Armutlu Ovacık Zonu kuzeyde İstanbul Zonu ve güneyde Sakarya Zonu arasında bu iki tektonik birliğin karışma zonu olarak tanımlanmıştır [39], [40]. Ancak daha önceki çalışmalarda bu zonda, Geç Paleozoyik-Erken Mesozoyik yaşlı Paleotetis Okyanusunun Erken Mesozoyik döneminde kuzeye doğru Avrasya Kıtasının altına dalarak tektonik evrimini tamamladığı belirtilmiştir [40]-[47].



Şekil 1. Türkiye'de zeolit oluşumları ve potansiyel zeolitli tüf alanları [37].

Tablo 1. Türkiye'deki zeolit yatakları ve ilgili mineralleri [34]'den değiştirilerek alınmıştır.

Yatak ve oluşum	İlgili Mineraller	Oluşum Biçimi	Kaynaklar
Beypazarı	Klinoptilolit, Analsim, Saponite, K-Feldispat, Smektit, Kuvars, Kalsit	Gösel ortam	[16]-[18]
Yozgat	Klinoptilolit, Smektit	Gösel ortam	[19]
Nevşehir (Kapadokya)	Erionit, Şabazit, Analsim, Filipsit, Mordenit+Klinoptilolit, Smektit, Kuvars, Opal-CT, K-Feldispat	Gösel ortam	[20]
Kırka	Klinoptilolit, Höyländit, Analsim, Kalsit, Opal-CT, Smektit, K-Feldispat, Kuvars	Gösel ortam	[21]
Emet	Klinoptilolit, Analsim, Opal-CT, K-Feldispat, Smektit, Kuvars, Kalsit	Gösel ortam	[22], [23]
Şile	Mordenite, K-Feldispat, Opal-CT, Kuvars	Hidrotermal	[24]
Bigadiç	Klinoptilolit, Höyländit, Analsim, Filipsit, Smektit, Opal-CT, Kuvars, K-Feldispat	Gösel ortam	[25]- [27]
Gördes	Klinoptilolit, Höyländit, Opal-CT, Kuvars, Smektit	Gösel ortam	[28]- [33]
Keşan	Analsim, Klinoptilolit, Smektit, Kuvars, Kristobalit, Kalsit	Gösel ortam	[34]

Armutlu-Ovacık Zonu içerisinde yer alan Armutlu Yarımadası'nda yüzeyleyen Permo-Triyas yaşlı Karakaya Karmaşığı birimlerini temsil eden düşük dereceli metamorfik kayalar yörede "İznik Metamorfitleri" [47] olarak adlandırılmıştır. Bu zon içerisinde yüzeylenen en yaşlı kayalar Prekambriyen yaşlı yüksek dereceli Armutlu Metamorfitleri'dir [47]-[49]. Diğer birim ise plaka içi bazaltları içeren terrijen kökenli, kalkerli ve volkanojenik birimlerden oluşan Triyas riftleşmesinin ürünleri olan İznik Metamorfitleri'dir [47]. İznik Metamorfitleri düşük dereceli felsik volkanik ve volkanotortul birimler içeren metakırıntılı-karbonat istifleriyle başlayıp blok, mercek ya da ara tabakalar halinde mermer kütleleri de içermektedir [47]. İnceleme alanında gözlenen örtü birimler Jura başında bir riftleşme sonucu (Neotetis'in kuzey kolu) gelişmiş, kıta kenarını temsil eden kırıntılı, volkanoklastik, platform ve yamaç türü karbonat çökellerinden oluşmaktadır [50]. Tüm bu istif Tersiyer yaşlı diğer birimler ile örtülmektedir. Çalışmanın konusunu oluşturan vitrik tüflerdeki zeolit oluşumları, volkonoklastik birimler içerisinde yer almaktadır.

Çalışma Alanının Jeolojisi

İzmit Körfezinin güneyinde Yalova-Karamürsel arasında yer alan çalışma alanında temelde Armutlu Metamorfitleri olarak adlandırılan [51], Merdigöz ve Dereköy Metamorfitlerinden sadece Dereköy Metamorfitleri gözlenmektedir. Bu birim [43]' tarafından Pamukova Metamorfitleri olarak adlandırılmıştır.

Dereköy Metamorfileri:

Alt Permiyen öncesi yaşlı, kumlu, killi ve yer yer karbonatlar ile tüflerin metamorfizmasından oluşan bu birim, metakumtaşı, fillit, kuvarsit şist, kalkışist, mermer ile bunların içinde yer alan Mahmudiye mermer ve Küçük Dikmen kuvarsit şist üyelerinden oluşmaktadır [49]. Bu birimi oluşturan kayaların, yeşil şist fasiyesinde metamorfizma geçirdikleri belirtilmiştir [51] (Şekil 3).

İhsaniye Granodiyoriti (Pzh): İhsaniye köyünün doğusunda yüzeylenen ve Dereköy Metamorfitlerini kesmekte olan bu birim ve Pliyosen yaşlı Yalakdere Formasyonu ile uyumsuz olarak örtülmektedir [51], [53], [54].

Taşköprü Kumtaşı (Trt): Bargu ve Sakınç [50] tarafından adlandırılan ve inceleme alanının batısında Taşköprü köyü civarında yüzeylenen Alt Triyas yaşlı bu birim genellikle kumtaşı seviyelerinin egemen olduğu, kumtaşı-silttaşı'ndan oluşmaktadır ve Kaytazdere Formasyonu (Alt-Orta Eosen) üzerine bindirme ile gelmektedir [51], [53], [54].

Oluklu Formasyonu (Ko): Karamürsel'in 2 km güneyinde Oluklu köyü civarında yüzeylenen, Kampaniyen-Maestrihtiyen yaşlı bu birim, tabanda Alt Triyas yaşlı Taşköprü Kumtaşı ile uyumsuz, üstte Maestrihtiyen yaşlı Kokarca Formasyonu ile uyumlu, ayrıca birimi çevreleyen Taşağıl Formasyonu (Alt-Orta Eosen) ile ise açılmal uyumsuzdur [51]. İstif tabanda, Taşköprü Kumtaşına ait kırmızı ve mor renkli çoğunlukla köşeli kumtaşı blokları ve

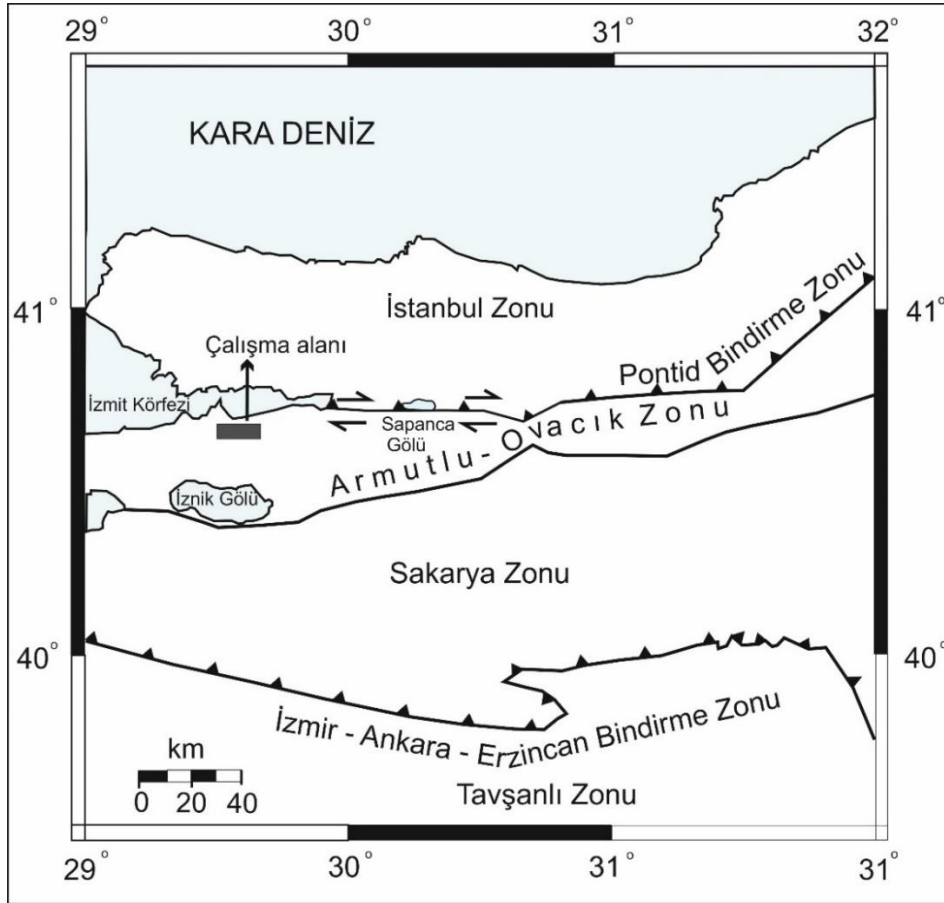
çakıltaşları içeren kalın tabakalı taban konglomerası ile başlar üste doğru ise orta-ince tabakalı çakıllı kumtaşı, gri kumtaşı, yeşil-gri silttaşı ve gri marn ardalanması ile devam eder [51], [53], [54].

Kokarca Formasyonu (Kk): Çalışma alanının doğusunda yüzeylenen, [50] tarafından adlandırılan Maestrihtiyen yaşlı bu birim, Dereköy Metamorfiti üzerinde açılmal uyumsuz olarak yer almaktadır, genellikle arenit, biyosparit ve biyomikrit gibi seviyelerden oluşmaktadır [51], [53], [54].

Taşağıl Formasyonu (Tya): Karamürsel, Karaahmetli, İnebeyli ve Taşağıl civarında yüzeylenen ve [51] tarafından adlandırılan bu formasyon genelde kuzeydoğu-güneybatı doğrultusunda yayılım göstermektedir. Bu formasyon tabanındaki Dereköy Metamorfiti, Oluklu ve Kokarca Formasyonları ile uyumsuz, üstünde ise aynı yaşlı Taşlıtepe Formasyonu ile uyumludur [51]. Formasyon orta tabakalı konglomeratik seviye ile başlar üste doğru ise mor kumtaşı, sarı-boz kumtaşı, Ostrea'lı kumlu-kireçtaşı, kırmızı kireçtaşı, killi kumtaşı, marn ara tabakalı kumtaşı, kumlu kireçtaşı, fosilli kireçtaşı, kumtaşı, aglomera ve kumtaşı ara tabakalı marn ile devam eder [51, 53, 54]. Bu formasyon içinde mercekler şeklinde İnebeyli Kireçtaşı Üyesi'ne ait kireçtaşları da yüzeylenmektedir [51].

Taşlıtepe Formasyonu (Tta): Çalışma alanının kuzeyinde yer alan Alt-Orta Eosen yaşlı bu formasyon Taşağıl Formasyonu üzerine dereceli geçişli ve uyumlu olarak gelmektedir, yine dereceli geçişli ve uyumlu olarak Kaytazdere Formasyonu tarafından üzerlenmektedir [51]. Formasyon, tabanda koyu gri renkli konglomera ile başladığı, üste doğru koyu boz renkli tüfler, çamurtaşı mercekleri, orta-iri çakıllı aglomera ve tuf ardalanması (yeşilimsi masif tüfler, ince-orta taneli ve beyaz renkli tüfler) ile devam ettiği, bunların arasında bazı seviyelerde ise kumtaşı, silttaşı, kilttaşı ile killi kireçtaşı ardalanması olduğu belirtilmiştir [51, 53, 54]. Buradaki tüflerin riyolitik ve riyodasitik karakterde olduğu, volkanik kökenli seviyeler ile yer yer ardalanmalı olan killi kireçtaşı seviyeleri içinde bulunan fosillere göre birimin Alt-Orta Eosen yaşında olduğu, çökme ortamının ise nadiren çok az derinleşen sığ deniz olduğu belirtilmiştir [51]. Çalışma sahasında, İnebeyli köyü ve Tepeköy civarından derlenen örnekler bu formasyona ait tüflerde yer almaktadır (Şekil 3).

Kaytazdere Formasyonu (Tka): Kaytazdere köyü ve batısında geniş alanlarda yüzeylenen bu birim üzerine Yalakdere, Kılınç ve Altınova Formasyonları açılmal uyumsuzlukla gelmektedir, batıda ise Taşköprü Formasyonuna ait kumtaşları ile tektonik dokanaklıdır [51]. Birim, tabanda kalınlığı yaklaşık 30 m olan kalın bir marn seviyesi ile başlayarak, üste doğru ise kumtaşı, silttaşı, marn, silttaşı, kumtaşı ardalanması ile devam etmektedir [51, 53, 54]. Bu kumtaşı tabakaları üzerine de kumtaşı - silttaşı ardalanmalı marn ve kumtaşı seviyeleri gelmektedir [51, 53, 54]. Bu formasyonun üyeleri; Karaçamur kireçtaşı üyesi, Geyikdere tuf üyesi, Tavşanlı tuf üyesi ve Handere tuf üyesi olarak tanımlanmıştır [54]. Çalışma alanında alttan üste doğru 3 farklı tuf üyesi (Geyikdere tuf üyesi, Tavşanlı tuf üyesi ve Handere tuf üyesi) yüzeylenmektedir.



Şekil 2. Bölgesel Jeoloji Haritası [5], [6].

Geyikdere Tüf Üyesi (T_{kag}): Geyikdere köyü ve civarında, kuzeydoğu-güneybatı uzanımlı olarak yaklaşık 500 m genişliğinde bir kuşak şeklinde yüzeylenen birim orta-kalın tabakalı, litik kristalli tüf ve camı kristalli tüflerden oluşmaktadır [51, 53, 54]. İncelenen Geyikdere köyü tüfleri bu üye içerisinde yer almaktadır (Şekil 3).

Tavşanlı Tüf Üyesi (T_{kat}): Tavşanlı köyü ve civarında, Geyikdere Tüf Üyesi gibi kuzeydoğu-güneybatı uzanımlı, yaklaşık 1000 m genişliğinde bir kuşak şeklinde yüzeylenen bu birim, genellikle grimsi yeşil ve yeşilimsi renkli tüflerden oluşmaktadır, ince taneli, masif görümlü, sert kırılmalı, orta-kalın tabakalıdır [51, 53, 54]. İncelenen Havuzdere köyü tüfleri bu üye içerisinde yer almaktadır (Şekil 3).

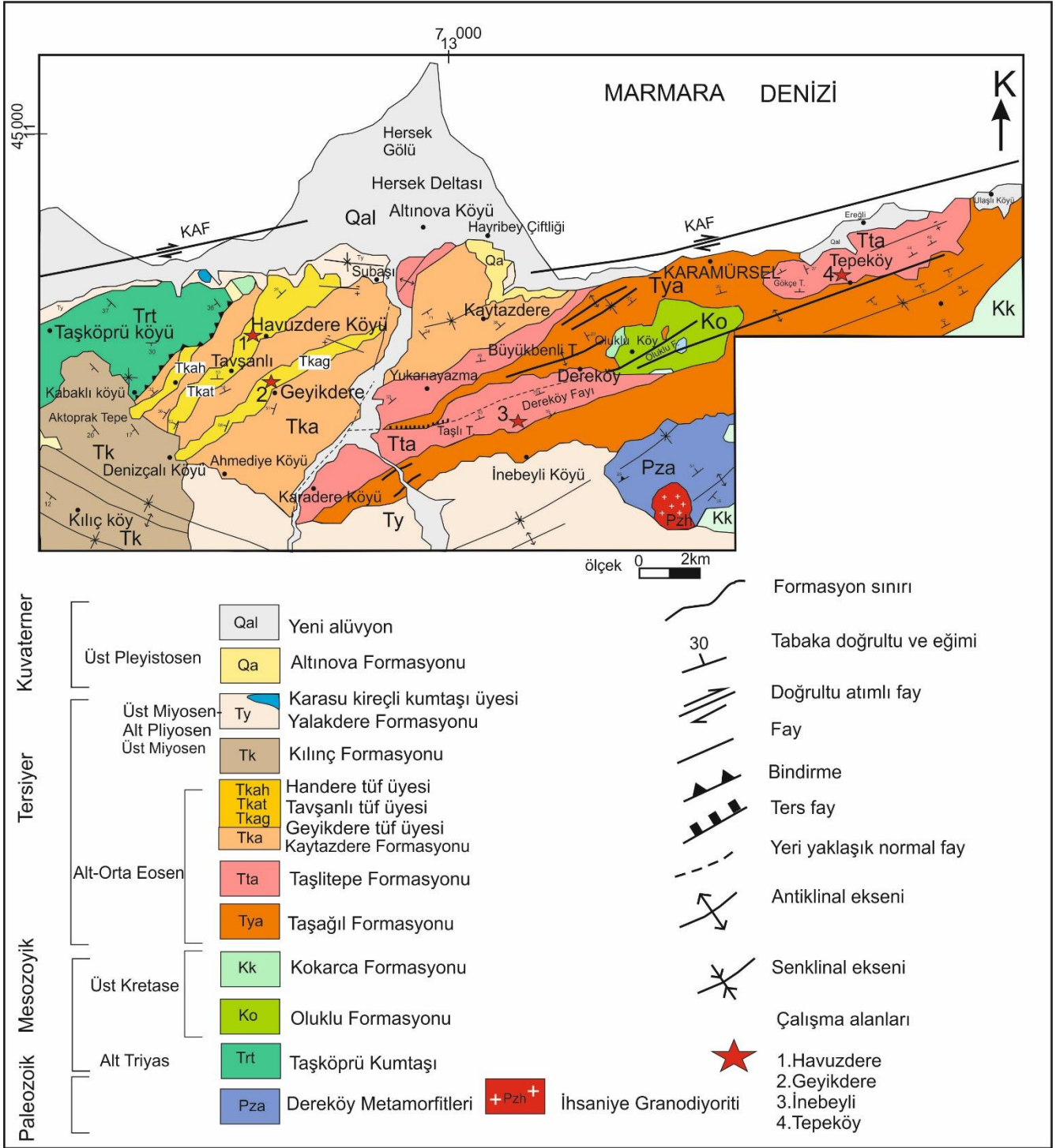
Handere Tüf Üyesi (T_{kah}): Handere köyü ve civarında yüzeylenen bu birim diğer tüf üyeleri gibi hemen hemen aynı doğrultuda, yaklaşık 500 m genişliğinde bir kuşak şeklinde uzanmakta olup üzerine ters fay dokanıklı Taşköprü formasyonuna ait kumtaşları gelmektedir [51]. Bu birimi oluşturan tüfler genellikle beyaz, yeşilimsi bazen de kahverenkli bantlıdır [50, 52, 53].

Kaytazdere Formasyonu, çökeltmenin oldukça kalın olduğu genellikle sığ, bazen derinleşen denizel ortamda oluştuğu; çökeltme sürecinde tüflerin oluşumunu sağlayan volkanik faaliyetlerin ise zaman zaman meydana geldiği belirtilmiştir [51]. Eosen oluşuklarının, birbirleriyle bağımsız küçük

havzalarda meydana geldiği, bu havzaların oluşumunun ise, Üst Kretase sonu ve Paleosen başında, Sakarya ve Pontid kıtalarının çarpışmasından ve okyanus tabanının yitirilmesinden sonra, lokal genişleme rejimleri sonucu oluşan kırıklar nedeniyle gerçekleştiği belirtilmektedir [51].

Kılınç Formasyonu (T_k): Kılınç köyü ve dolaylarında geniş alanlarda yüzeylenen bu formasyon, kuzeyde Alt Triyas yaşlı Taşköprü formasyonu ve Alt Orta Eosen yaşlı Kaytazdere formasyonları üzerine açısal uyumsuz olarak gelmektedir, üzerinde yer alan Miyosen-Pliyosen yaşlı Yalakdere Formasyonu ile uyumlu ve geçişli, Geç Pleyistosen yaşlı Altınova formasyonu ile ise açısal uyumsuzdur [51]. Birim alttan üste doğru kırmızı kahve renkli konglomera, çakıllı kumtaşı, kırmızımsı kumtaşı, silttaşı, sarımsı-boz siltli kiltası, çakıllı kumtaşı, sarımsı-beyaz silttaşı ve kiltası, kömür bantlı kiltası, mavimsi beyaz kiltası ve marn ile killi kireçtaşı içeren beyazımsı marn'lerden oluşmaktadır [50, 52, 53].

Yalakdere Formasyonu (T_y): Bu formasyon Kaytazdere, Taşağul ve Taşlitepe Formasyonu üzerine açısal uyumsuzlukla gelmektedir, güneyde ise Dereköy Metamorfileri ve Kocarca Formasyonu ile uyumsuz dokanıklıdır [51]. Birim, gevşek çimentolanmış çakıllı, kumlu, siltli seviyeler ile yer yer kiltası ardalımasından oluşmaktadır [50, 52, 53]. Üst seviyelerinde ise, Karasu Kireçli Kumtaşı üyesi yer almaktadır.



Şekil 3. Çalışma alanının jeoloji haritası [51], [53]'dan değiştirilerek alınmıştır.

Karasu Kireçli Kumtaşı Üyesi (Tyk): Yalakdere Formasyonunun üst kesimlerinde görülen bu birim, devamı olmayan seviyeler halinde genellikle beyaz, sarımsı beyaz

renkli gösel kireçli kumtaşı ve silttaşı araldanmasından oluşmaktadır [50, 52, 53].

Altınova Formasyonu (Qa): Bargu ve Sakınç [51] tarafından adlanan birim, Taşağıl, Yalakdere ve Taşköprü Kumtaşı birimleri üzerine açısız uyumsuz olarak gelmektedir. Bölgede taraçalar şeklinde görünen bu birim genellikle gevşek tutturulmuş Ostrea'lı kum, killi kum, siltli kum, marn, marn ve Cerastoderma'lı kum seviyelerinden oluşmaktadır [50, 52, 53]. Eski alüvyon (Qale): Nehir oluşumlarına ait çakıl ve kum boyu malzeme içermektedir, yeni alüvyon (Qal) ve (Qy): yamaç döküntüsü altındaki birimleri uyumsuz olarak üzerlemektedir.

Petrografik ve Mineralojik Çalışmalar

Optik Mikroskop çalışmaları

İnceleme alanından derlenen Geyikdere ve Havuzdere örnekleri Kaytaşdere tuf üyelerinde, İnebeyli ve Tepeköy örnekleri ise Taşlıtepe Formasyonuna ait tuf birimlerinde yer almaktadır. Bu birimlere ait tuf örnekleri mikroskopta incelendiğinde, bunların litik tuf, kristal tuf ve vitrik tüflerden oluştuğu belirlenmiştir. XRD analiz sonuçlarına göre sadece vitrik tüflerde zeolit oluşumları belirlenmiştir. Bu nedenle vitrik tüflerin petrografik özellikleri detaylı incelenmiştir. Bu zeolitli örnekler makroskobik olarak açık yeşil, yeşilimsi renk, masif görünümündedir (Şekil 4). İnce kesit çalışmaları Schmid [55] sınıflandırmasına göre adlandırılmıştır. İnceleme alanında zeolit içeren örneklerin modal mineralojik bileşimine göre volkan camı (%90), pirojenik mineraller ise balıca feldispat, kuvars, biyotit mineralleri (%8), opak ve FeO'leşmiş mineral (%2) olarak belirlenmiştir (Tablo 2). Bu minerallerin varlığına göre tüflerin ağırlıklı olarak felsik bileşime sahip olduğunu söylenebilir. Aynı şekilde, tüflerin mineralojik bileşimi, Schmid [55] tarafından tanımlanan riyodasitik-riyolitik bileşim ile uyumludur. Mikroskobik çalışmalara göre hamur mikrokristalin malzeme ile çoğunlukla volkan camı kıymıklarından oluşmaktadır (Şekil 5). Kırıntılar (detritus) fenokristallerden oluşmaktadır. Kuvars, düzensiz köşeli taneler halinde, nadiren bipiramidal formlar şeklinde bulunur. Çoğunlukla sodik plajiyoklaz ile temsil edilen feldispatlar, polisentetik ikiz lamelleri olan, düzensiz taneler halinde bulunur. Biyotit mineralleri ince-uzun levhamsı şekillerde görünür ve en bol bulunan mafik mineraldir. Camsı parçalar, volkan camı kıymıkları şeklinde gözlenmektedir. Bu volkan camı kıymıkları genellikle köşeli, kırılmış olup oldukça iyi korunmuşlardır (Şekil 5).

XRD Çalışmaları

Tepeköy, İnebeyli köyü ve Havuzdere köyü'nden derlenen zeolit örneklerinin XRD analiz sonuçlarına göre klinoptilolit minerali gözlenirken, Geyikdere köyü XRD verilerinden ise höylandit minerali tesbit edilmiştir (Şekil 2). Tepeköy 8.91 ile 1.37 Å, İnebeyli 8.96 ile 1.95 Å, Havuzdere 8.90 ile 1.77 Å klinoptilolit pikleri tanımlanırken, Geyikdere 8.89-1.95 Å höylandit pikleri tanımlanmıştır (Şekil 6). Tepeköy örneklerinde, klinoptilolit yanında 3,33, 4,24 ve 1,81 Å ile kuvars minerali tanımlanmıştır. Klinoptilolit-höylandit mineralleri tufün alterasyon ürünüdür ve volkan camı kıymıklarının yerini almıştır. Volkan camı kıymıklarının devitrifikasyon ürünü

olan mikrokristalin malzeme anizotropiktir ve optik mikroskop ile tanımlanamaz, daha büyük volkan camı kıymıkları optik mikroskop ile tanımlanmıştır. X-ışınları kırınımı analizi ile mikrokristalin malzemenin ve volkan camı kıymıklarının, Tepeköy, İnebeyli, Havuzdere Köyü'nde klinoptilolit, Geyikdere Köyü'nde ise höylandit gibi ikincil zeolit minerali tarafından yeri alınmış olduğu belirlenmiştir (Tablo 2).

Tablo 2. Çalışma alanlarından alınan örneklerin XRD ve optik mikroskop çalışmalarına göre mineral parajizi.

Örnek Lokasyonu	Mineralojik Bileşimi
Havuzdere	Klinoptilolit, feldispat, kuvars, biyotit, opak mineraller ve FeO' oluşumu
Geyikdere	Höylandit, feldispat, kuvars, biyotit, opak mineraller ve FeO' oluşumu
İnebeyli	Klinoptilolit, feldispat, kuvars, biyotit, opak mineraller ve FeO' oluşumu
Tepeköy	Klinoptilolit, feldispat, kuvars, biyotit, opak mineraller ve FeO' oluşumu

SEM+EDS analizleri

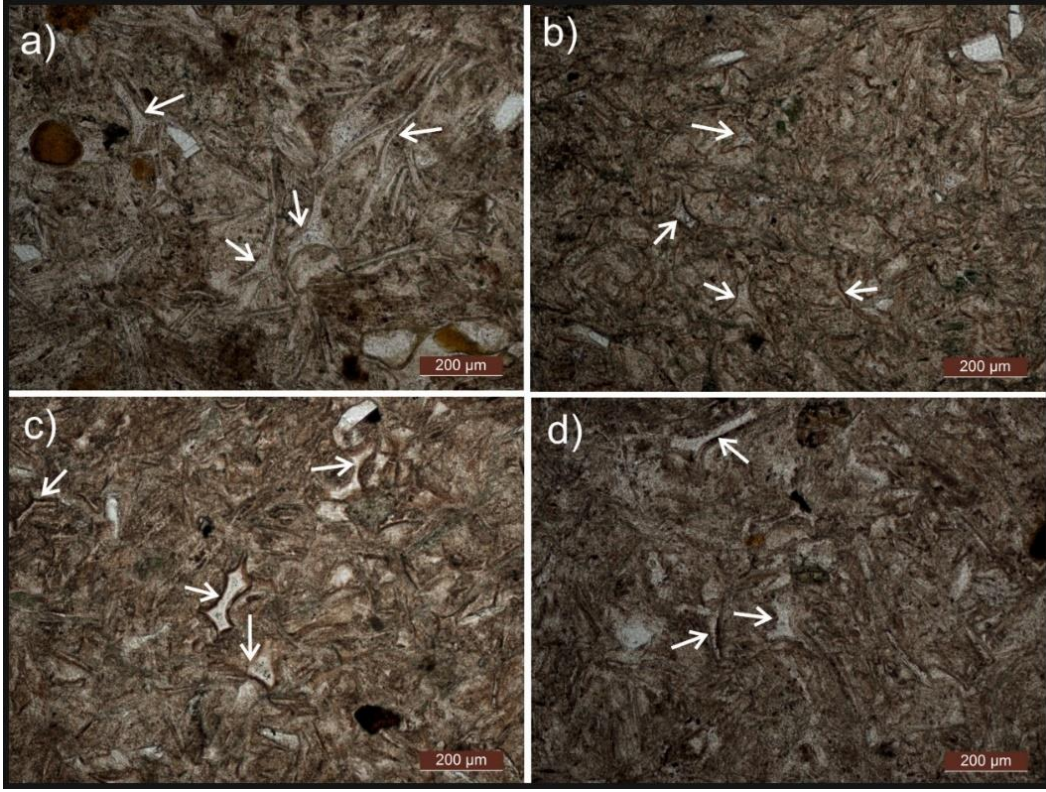
Scanning Elektron Mikroskobu (SEM) ile incelenen örneklerde, Geyikdere zeolitik tüflerinin, höylandit kristalleri için tipik yapı olan yassı (tabular) kristalleri birbiri ile kenetli yapı oluşturmaktadır (Şekil 7). Höylanditlerin Si/Al oranı 1.86 ile 5.44 aralığında değişmektedir (ortalama, 3.48, n=6 ölçüm). Klinoptilolit minerali de matrikste oluşur, volkan camının yerini alır (Tepeköy, İnebeyli ve Havuzdere Köyü). Tepeköy'de Si/Al oranı 3,37 ile 5.7 aralığında değişmektedir (ortalama=4,49 n=4). İnebeyli köyü'nde Si/Al oranı 3,84 ile 5,15 aralığında değişmektedir (ortalama=4,64, n=10 ölçüm). Havuzdere köyü'nde, Si/Al oranı ise 3, 51 ile 4,59 aralığında değişmektedir (ortalama=4,20 n=4) tür. Bish ve Boak [8], klinoptilolit ve höylandit katı serisinde Si/Al oranı <4 höylandit, Si/Al>4 klinoptilolit ile karakterize edildiğini belirtmiştir. Buna göre çalışma alanındaki Si/Al oranları Geyikdere için höylandit, Tepeköy, İnebeyli ve Havuzdere içinde klinoptilolit için uyumlu olduğu belirlenmiştir. Tepeköy SEM incelemeleri XRD sonuçları ile uyumludur. EDS sonuçlarında Na, K, Ca, Al içeriği görülmekle birlikte bir miktar kuvars olduğu için Si içeriği ve ayrıca çok az Mg ve Fe içeriği de az miktar kil olduğunu göstermektedir (Şekil 7). İnebeyli Köyü SEM-EDS sonuçları da XRD ile uyumludur. İnebeyli Köyü örneğinin XRD difraktogramında tamamen klinoptilolitten oluştuğu belirlenmiştir (Şekil 7b). Havuzdere Köyü, SEM ve EDS sonuçları, XRD difraktomlarında tesbit edilen klinoptilolit minerali ile uyumludur. EDS sonucuna göre çok az Mg ve Fe içeriği çok kil minerali içerdiğini göstermektedir (Şekil 7). Geyikdere örneğinin XRD difraktomlarında höylandit

minerali tesbit edilmiştir. SEM ve EDS sonuçları da XRD ile uyumdur (Şekil 7).

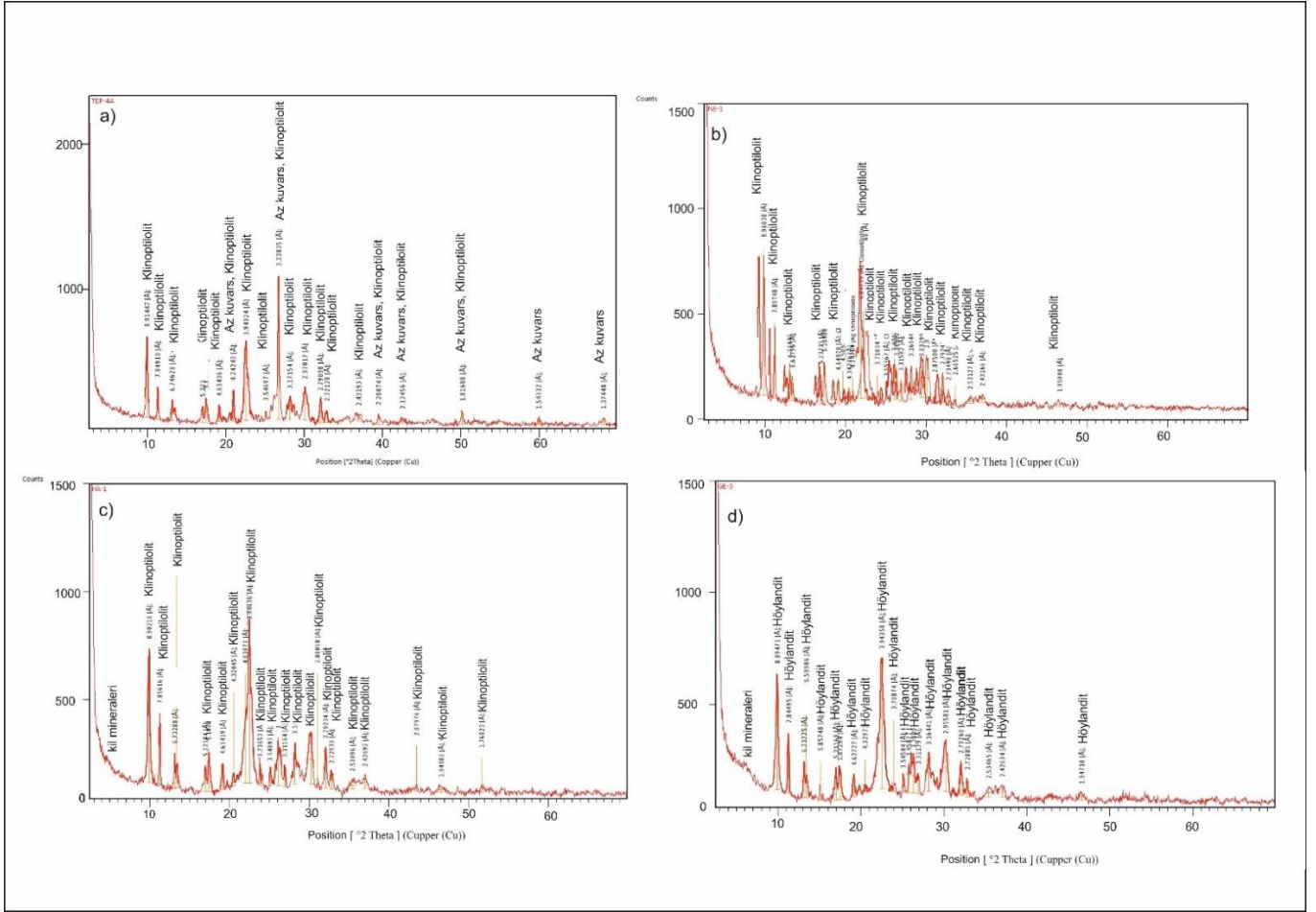
İyi gelişmiş klinoptilolitler volkan camı kıymıkları psödomorflarında oluşmuştur yada monoklinik mikrokristal demetleri şeklinde boşluk, çatlaklarda büyümüştür (Şekil 5a,b,c ve 7). Zeolitler, volkan camı kıymıklarının yerini almışlardır yada boşlukta iyi gelişmiş kristaller şeklindedirler (Şekil 7).



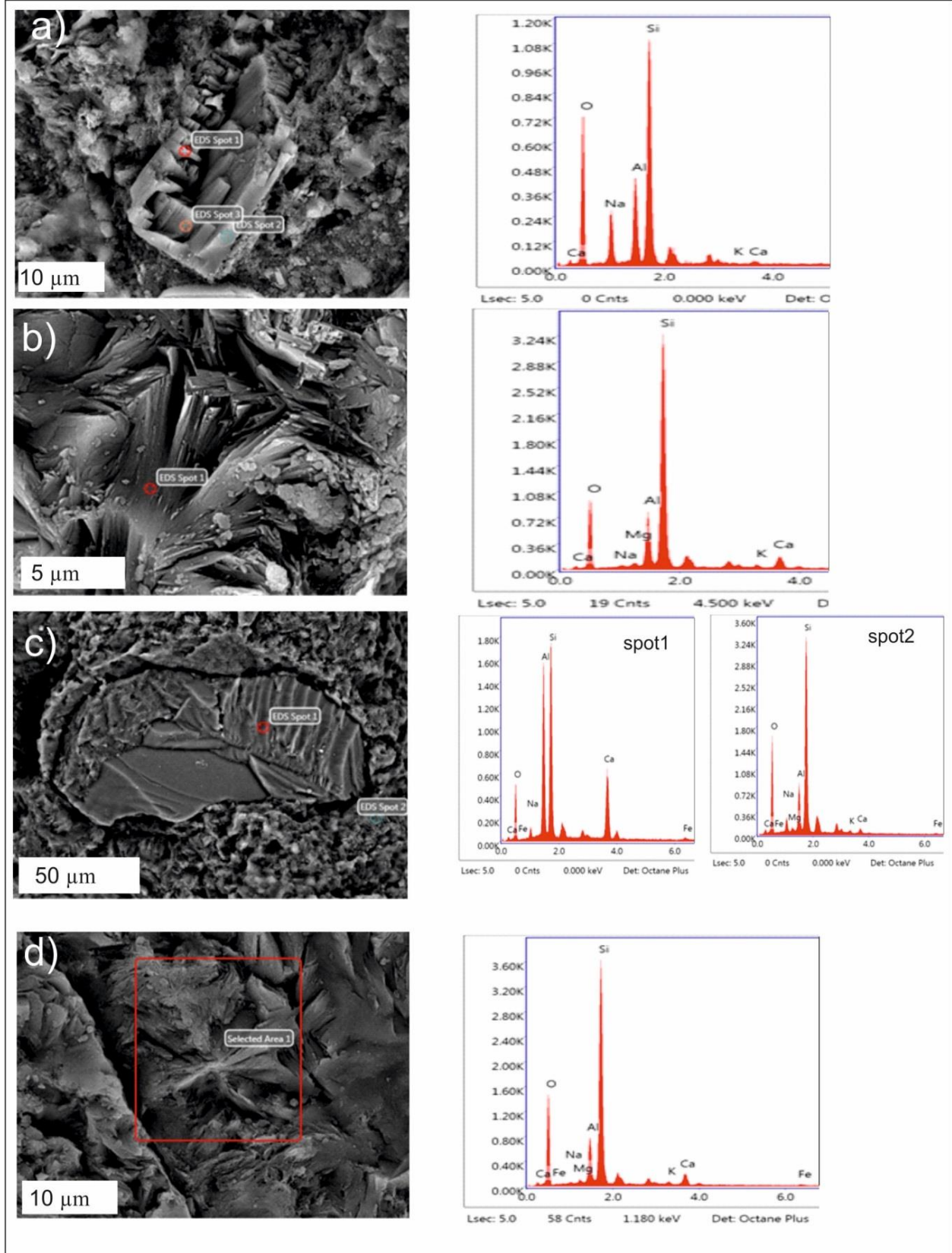
Şekil 4. Çalışma sahasında a) Tepeköy, b) İnebeyli, c) Havuzdere, d) Geyikdere'den alınan zeolit içeren tüflerin makro görünümleri.



Şekil 5. Çalışma alanındaki zeolitik tüflerin ince kesit fotoğrafları (1. nikol), volkan camı kıymıkları (beyaz oklar) (a) Tepeköy, b) İnebeyli, c) Havuzdere, e) Geyikdere. İnce taneli volkan camı matrisinde, tipik olarak sivri uçlu-köşeli volkan camı kıymıkları a, b, c, d.



Şekil 6. Çalışma alanından derlenen zeolitik tüflerin X-Ray difraktogramları (a) Tepeköy, b) İnebeyli, c) Havuzdere, e) Geyikdere).



Şekil 7. Çalışma alanındaki zeolitik tüflerin SEM ve EDS (noktasal ve alansal) görüntüleri: a) Tepeköy b) İnebeyli köyü, c) Havuzdere köyü, d) Geyikdere.

Tartışma ve Sonuç

Çalışma alanındaki zeolit oluşumlarından İnebeyli ve Tepeköy zeolit oluşumları, Alt-Orta Eosen yaşlı Taşlıtepe formasyonuna ait tüfler içerisinde yer almaktadır. Geyikdere zeolit oluşumları Orta-Üst Eosen yaşlı Kaytazdere Formasyonuna ait Geyikdere tuf üyesinde, Havuzdere zeolit oluşumları ise Kaytazdere Formasyonuna ait Tavşanlı Tuf üyesi içinde yer almaktadır. Çalışma alanındaki zeolitler, vitrit tüflerde volkan camı kıymıklarının devitrifikasyonu sonucu oluşmuşlardır. Yapılan XRD ve SEM-EDS analizlerine göre Tepeköy, İnebeyli, Havuzdere tüflerinde zeolit minerali klinoptilolit minerali iken, Geyikdere zeolit oluşumlarında ise höylandit minerali olduğu belirlenmiştir. SEM gözlemlerine göre klinoptilolit ve höylandit hipidiyomorf-allotriyomorf olarak oluşmuşlardır, volkanik cam kıymıklarının yerini almışlardır ve yer yer açık boşluk gözeneklerine doğru büyümüşlerdir, yer yer de tuf matriksinde ince taneli kül partiküllerinin yerini almışlardır. Yan kayacın kimyasal bileşimi, oluşan zeolit türünü belirlemede önemlidir [9]. Yüksek-silika zeolitleri mordenit, klinoptilolit ve höylandit gibi zeolit mineralleri asidik kayalarla ilişkilidir. Çalışma alanındaki zeolitlerin oluştuğu kayalar, petrografik çalışmalara ve [55]'a göre riyolitik ve riyodasit özellik gösteren asidik karakterli tüflerdir. Alt-Orta Eosen yaşlı Taşağıl, Taşlıtepe, Kaytazdere Formasyonlarının litolojileri ve kapsadığı fosiller, bu birimlerin zaman zaman derinleşen, genellikle sığ denizel ortamı belirtmektedir [55]. Volkanik tüflerin ve aglomeraların bulunuşu, bu devrede volkanik faaliyetlerin zaman zaman egemen olduğunu göstermektedir. Ayrıca bölge Üst Eosenden sonra Oligosende kara haline gelmiştir [55]. Dolayısı ile bu zeolitik tüflerin 'Kıyıda veya derin denizel ortamda volkanik malzemenin birikip deniz suyu ile reaksiyonu sonucu oluşan yataklar sınıfına' girdiğini söyleyebiliriz.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması belirtilmemiştir.

Teşekkür

Bu çalışma kapsamında, İnce kesitlerin yapımı için Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, İnce kesit laboratuvarı çalışanlarına, SEM + EDS çalışmalarını için Ufuk Kibara teşekkür ederiz.

Etik Standartlar Beyanı:

Yazarlar bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve yasal-özel izin gerektirmediğini beyan eder.

Kaynakça

- [1] E. Yiğitbaş, A. Elmas, and, Y. Yılmaz, "Pre-Cenozoic tectono-stratigraphic components of the Western Pontides and their geological evolution", *Geological Journal*, vol.34, pp.55-74. 1999.
- [2] A. Elmas and E. Yiğitbaş, "Ophiolite Emplacement by Strike-Slip tectonics between The Pontide Zone and the Sakarya Zone in Northwestern Anatolia in Turkey", *Int J Earth Sciences*, vol. 90, pp.257-269, 2001.
- [3] A. Elmas, "Late Cenozoic, tectonics and stratigraphy of northwestern Anatolia: the effects of the North Anatolian Fault to the region", *Int J Earth Sci*, vol.92, pp.380-396, 2003.
- [4] E. Yiğitbaş, A. Elmas, A. Sefunç, and A. Özer, "Major Neotectonic features of eastern Marmara region, Turkey: development of the Adapazarı– Karasu Corridor and its tectonic significance", *Geological Journal*, vol.39, pp.179-198, 2004b.
- [5] Ö. Emre, T.Y. Duman, S. Özalp, H. Elmacı, S. Olgun, and F. Şaroğlu, "Active fault map of Turkey with an explanatory text 1:1,250,000 scale" *General Directorate of Mineral Research and Exploration, Special Publication Series*, vol.30, 2013.
- [6] M.D. Cambaz and H. Karabulut, "Love-wave group velocity maps of Turkey and surrounding regions", *Geophysical Journal International*, vol.181, pp. 502-520, 2010.
- [7] A. Hall, "Zeolitization of volcanoclastic sediments: the role of temperature and pH", *Journal of Sedimentary Research*, vol. 68, pp.739–745, 1998.
- [8] D.L. Bish and J.Boak, "Clinoptilolite-Heulandite Nomenclature. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*", vol. 45 (1), pp. 207-216, 2001.
- [9] A. Iijima, "Geology of natural zeolites and zeolitic rocks", *Pure and Applied Chemistry*, vol.52, pp. 2115–2130, 1980
- [10] R.L. Hay, R.A. Sheppard, "Occurrence of zeolites in sedimentary rocks: an overview. Pp. 217234 in: *Natural Zeolites: Occurrence, Properties, Applications* (D. Bish and D. Ming, editors)", *Reviews in Mineralogy*, 45, *Mineralogical Society of America*, Washington, 2001.
- [11] S. Ogihara, "Composition of clinoptilolite formed from volcanic glass during burial diagenesis " *Clays and Clay Minerals*, vol. 48, pp.106-110, 2000.
- [12] A. Hall, "Zeolitization of volcanoclastic sediments: the role of temperature and pH ", *Journal of Sedimentary Research*, vol. 68, pp. 739–745, 1998.
- [13] R.L. Hay, and R.A. Sheppard, "Zeolites in open hydrologic system, pp.93-102 in: *Mineralogy and Geology of Natural Zeolites* (F.A. Mumpton, editör) " *Mineralogical Society of America*, Washington, D.C., 1981.

- [14] R.A. Sheppard, "Zeolites in sedimentary rocks" *U.S. Geological Survey Professional Paper*, vol. 820, pp. 689-695, 1973.
- [15] G.R.Mas, L. Bengochea, and L.C. Mas, "Hydrothermal alteration at El Humazo Geothermal area, Domuyo Volcano, Argentina", *Proceedings of the World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan*, pp. 1413-1418, 2000.
- [16] M.N. Gündoğdu, Ö .Tenekeci, F. Öner, A. Dündar, S. Kayakıran, "Clay mineralogy of Beypazarı Trona deposits: Preliminary results" pp. 141-143 in: *Proceedings of the 2nd Turkish National Clay Symposium*. Hacettepe University, Ankara, Turkey, 1985.
- [17] C.Helvacı, U.İnci, F.Yağmurlu, H.Yılmaz, "Batı Anadolu'nun Neojen Stratigrafisi ve Ekonomik Potansiyeli" *Akdeniz Üniversitesi Isparta Mühendislik Fakültesi Dergisi*, vol.3, pp. 31-45, 1987.
- [18] H.H. Schmitz, "Ölschiefer des Miozäns in der Türkei-eine außergewöhnliche Genese in Zentralanatolien" *Geologisches Jahrbuch*, vol. A127, pp.365-390, 1991
- [19] H. Yalcın, A.I. Karayığit, E. Cicioğlu, and G. Gümüşer, "Relationship between clay mineralogy and whole rock geochemistry of Sorgun (Yozgat) Eocene Coal Basin, Central Anatolia, Turkey", pp. 15 -24 in: *Proceedings of the 8th National Clay Symposium, Kütahya, Turkey, 1997*.
- [20] A. Temel, and M.N. Gündoğdu, "Zeolite occurrences and the erionite-mesothelioma relationship in Cappadocia, Central Anatolia, Turkey", *Mineralium Deposita*, vol.31, pp. 539-547, 1996.
- [21] H.Yalçın, "Kırka (Eskişehir) yöresi volkano-sedimentar oluşumlarının mineralojik-petrografik ve jeokimyasal incelenmesi", PhD thesis, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 209 pp, 1988.
- [22] H.Yalçın, and M.N. Gündoğdu, "Emet gölsel Neojen baseninin kil mineralojisi II. Ulusal Kil Sempozyumu Bildirileri", M.N. Gündoğdu., H. Aksoy (eds.), Hacettepe Üniversitesi, Ankara, pp. 155-170, 1985.
- [23] H.Yalçın, and M.N. Gündoğdu, "Neojen yaşlı Emet gölsel volkanosedimenter baseninin mineralojik-petrografik incelenmesi: Neoformasyon minerallerinin oluşumu ve dağılımı"e *Yerbilimleri*, vol.14, pp. 45-61, 1987.
- [24] F. Esenli, B.Uz, and I.Kumbasar, "Mordenite type zeolite occurrence in the Upper Cretaceous volcanics of Şile region, İstanbul-Turkey" *Geological Bulletin of Turkey*, vol. 40, pp. 43-49, 1997.
- [25] M.N. Gündoğdu, "Bigadiç, gölsel baseninin jeolojisi", *Yerbilimleri*, vol. 11, pp. 91 -104, 1984.
- [26] A.Sirkecioğlu, F.Esenli, I.Kumbasar, R.H. Eren, and E.A. Şenatarlar, "Mineralogical and chemical properties of Bigadiç, clinoptilolite", pp. 291-302 in: *International Earth Sciences Congress on Aegean Regions (IESCA 1990) V I* (M.Y. Savaşçın and A.H. Eronat, editors), 1990.
- [27] M.N.Gündoğdu, C.Bonnot-Coutois, and N. Clauer, "Isotopic and chemical signatures of sedimentary smectite and diagenetic clinoptilolite of lacustrine Neogene basin near Bigadic", Western Turkey. *Applied Geochemistry*, vol. 4, pp. 635 644,1989.
- [28] F. Esenli, and I.Özpeker, "Zeolitic diagenesis of Neogene basin and the mineralogy of Heulandite-Clinoptilolite around Gördes", *Geological Bulletin of Turkey*, vol.8, pp.1 -18, 1993.
- [29] F.Esenli, "The chemical changes during zeolitization (Heulandite-Clinoptilolite type) of the acidic tuffs in the Gördes Neogene Basin" *Geological Bulletin of Turkey*, vol.6, pp. 37-44, 1993.
- [30] A. Baykal, "Güneşli (Gördes) zeolitli Neojen serilerinin kil mineralojisi", pp. 141 -143 in: *VII Ulusal Kil Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, Turkey, 1995*.
- [31] A. Vural, and M. Albayrak, "Gördes ve Çevresi zeolitlerinin mineralojisi", pp. 140-141, 58. *Türkiye Jeoloji Kurultayı, Bildiriler Kitabı, Ankara, 2005*.
- [32] A. Vural, and M. Albayrak, "Geochemical and mineralogical properties of zeolites from Gördes Manisa and Its near vicinity", pp. 2390-2398, 2nd International Conference on Engineering and Natural Sciences (ICENS 2016), Saray Bosna, Bosna Hersek, 2016.
- [33] A. Vural, and M. Albayrak, "Evaluation of Gördes zeolites in terms of mineralogical, geochemical and environmental effects", *Journal of Engineering Research and Applied Science*, vol. 9(2), pp. 1503 -1520, 2020.
- [35] S. İçöz, and A.Türkmenoğlu, "Mineralogical, petrographical and geochemical investigation of Eocene-Oligocene clastics from Keşan region, related to their origins", Thrace, pp. 37-49 in: *Proceedings of the VIII National Clay Symposium, Kütahya, Turkey, 1997*.
- [36] H. Kaçmaz and U. Köktürk, "Geochemistry and mineralogy of zeolitic tuffs from the Alaçati (Çeşme) area, Turkey", *Clay and Clay Minerals*, vol. 52, No.6, pp.705-713, 2004.
- [37] F. Öner, M. Albayrak, "Batı Anadolu, Trakya Kapadokya Yöresi Zeolitleri Mineralojik Veri Kitabı", *MTA Raporu No: 2008*, pp. 204s, 2007.
- [38] E. Yiğitbaş, A. Elmas, and Y.Yılmaz, "Pre-Cenozoictectono-Stratigraphic Components of The Western Pontides And Their Geological Evolution", *Geological Journal*, vol. 34, pp. 55-74, 1999.
- [39] A.Elmas, E. Yiğitbaş, "Comment on "Tectonic evolution of the Intra-Pontide suture zone in the Armutlu Peninsula, NW Turkey" by Robertson and Ustaömer. Discussion". *Tectonophysics*, vol. 405, pp. 213-221. 2005, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.05.007>.
- [40] S. A. Adamia, M. B. Lordkipanidze, and G. S. Zakariadze, "Evolution of an active continental margin as exemplified by the Alpine history of the Caucasus", *Tectonophysics*, vol. 40, pp.183-189, 1977.
- [41] A. H. F. Robertson, and J. E. Dixon, "Introduction: aspects of the geological evolution of the Eastern Mediterranean. In: J.E. Dixon, & A.H.F. Robertson, (Eds.) *The Geological evolution of the Eastern Mediterranean*",

- Geological Society, London, Special publications, vol. 17, pp. 1-74, 1984
- [42] J. Dercourt, L. P. Zonenshain, L. E. Ricou, V.G.Kazmin, X.Le Pichon, A. L.Knipper, C. Grandjacquet, I. M. Sbertshikov, V.Geyssant, C.Lapurier, D. H Perhersky, J.Boulin, J. C.Sibuet, L. A.Savostin, O. Sorokhtin, M.Westphall, M. L.Bazhenov, J. P. Lauer, B.Biju-Duval, "Geological Evolution of the Tethys Belt from the Atlantic to the Pamirs since the Liassic", *Tectonophysics*, vol.123, pp.241-315, 1986.
- [43] T. Ustaömer, and A. H. F. Robertson, "Tectonic-sedimentary evolution of the north Tethyan margin in the Central Pontides of northern Turkey", In: A.G. Robinson (Ed), *Regional and Petroleum Geology of the Black Sea and Surrounding Region* (pp. 255-290). *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, vol. 68, 1997.
- [44] T. Ustaömer, and A.H.F. Robertson, "Geochemical evidence used to test alternative plate tectonic models for the pre-Upper Jurassic (Palaeotethyan) units in the Central Pontides, N. Turkey", *Geological Journal*, vol. 34, pp. 25-53, 1999.
- [45] G. M. Stampfli, "Tethyan oceans. In E. Bozkurt, J. A. Winchester, J. D. A. & Piper (Eds.), *Tectonics and Magmatism in Turkey and the Surrounding Area*" (pp. 163–185). Geological Society, London, Special Publications, vol.173, 2000.
- [46] A.Ü. Okay, "Was the Late Triassic orogeny in Turkey caused by the collision of an oceanic plateau? In: BOZKURT, E., WINCHESTER, J.A. & PIPER, J.A.D. (eds), *Tectonics and Magmatism in Turkey and Surrounding Area*", *Geological Society*, London, Special Publications vol. 173, pp. 25-41, 2000.
- [47] M. Akartuna, "Armutlu Yarımadasının Jeolojisi, Armutlu Yarımadasının Jeolojisi", *İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi Monografileri*, vol. 20, pp.105, 1968.
- [48] A.H.F. Robertson, and T. Ustaömer, "Tectonic evolution of the Intra-Pontide suture zone in the Armutlu Peninsula, NW Turkey", *Tectonophysics*, vol. 381, pp.175-209, 2004
- [49] A. Elmas and E.Yiğitbaş, "Ophiolite emplacement by strike-slip tectonics between the Pontide Zone and the Sakarya Zone in northwestern Anatolia, Turkey", *International Journal of Earth Sciences*, vol.90, no:2, pp. 257-269, 2001.
- [50] A. M. C. Şengör and Y. Yılmaz, "Tethyan evolution of Turkey, a plate tectonic approach", *Tectonophysics*, vol. 75, pp. 181-241. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90275-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90275-4), 1981.
- [51] S.Bargu and M.Sakınç, "Armutlu Yarımadasında Karamürsel ile İznik gölü arasındaki kesimin doğal agrega potansiyelinin araştırılması ve değerlendirilmesi", Tübitak, TBAG-587, Ankara, 2006s, 1984.
- [52] MC. Göncüoğlu, V. Toprak, A. Erler, and İ.Kuşçu, "Orta Anadolu Masifi'nin batı bölümünün jeolojisi, Bölüm 1: Güney Kesim", *TPAO Rapor No. 2909*. 176s, 1991.
- [53] F.Z. Özgür, "Armutlu yarımadası zeolitli tüflerinin jeolojik, mineralojik ve jeokimyasal incelenmesi" İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2005s, 2005.
- [54] S. Bargu, and M. Sakınç, "İzmit Körfezi ile İznik Gölü Arasında Kalan Bölgenin Jeolojisi ve Yapısal Özellikleri" *İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yerbilimleri Dergisi*, vol. 6, No.1-2, pp. 45-76, 1989/1990
- [55] R.Schmid, "Descriptive Nomenclature and Classification of Pyroclastic deposits and Fragments", *Geol Rundschau*, pp 794-799, 1981.



Investigation of the settling behavior of lateritic nickel ores in the CCD process after HPAL

Öykü KESKİN¹, N. Metin CAN^{2*}

¹ Meta Nickel Cobalt Industry and Trade Plc., oykukeskin00@gmail.com, Orcid No: 0000-0002-7634-6257

² Hacettepe University, Mining Engineering Department, metin.can@hacettepe.edu.tr Orcid No: 0000-0003-0214-0720

ARTICLE INFO

Article history:

Received 13 December 2023
Received in revised form 23 January 2024
Accepted 6 February 2024
Available online 29 March 2024

Keywords:

Lateritic ore, settling behavior, flocculant, HPAL, CCD

Doi: 10.24012/dumf.1403686

* Corresponding author

ABSTRACT

In this study, the settling performance of lateritic nickel ores in the Counter Current Decantation (CCD) thickeners following the High-Pressure Acid Leaching (HPAL) process was investigated in detail. The samples used within the scope of the study were obtained from the overflow of the 2nd CCD thickener under the condition that Manisa-Gördes and Eskişehir-Karaçam lateritic nickel ores were fed to the plant at different times. A series of settling tests were performed for both ores using anionic, cationic, and nonionic flocculants of various ionicity and molecular weight. Sedimentation performance was evaluated based on parameters such as settling time, clarity, and compression. To determine the optimum conditions for the tests, a preliminary test was performed, and the pulp solids content was determined as 7% and the flocculant dosage as 850 g/t. According to the test results, nonionic and very low anionic flocculants gave better results. It was found that flocculation was negatively affected with increasing anionicity, and results could be obtained only with very low anionicity flocculants. It was determined that the settling rate was very fast with cationic flocculants, but the amount of compression was not favorable, especially for Gördes ore. However, it is envisaged that the amount of consumption can be reduced if cationic flocculants are used especially for Karaçam ore. When a comparison was made between the ores, similar results were obtained in general and only for Karaçam ore, thickener underflow density gave a successful result for all flocculant performances. On the other hand, it was concluded that variable ore structures and unstable process parameters influence the flocculant adsorption mechanisms and thus on the settling behavior.

Introduction

The leaching process under high temperature and pressure with sulfuric acid solution, which is one of the methods for the enrichment of lateritic nickel ores by hydrometallurgical methods, is called High Pressure Acid Leaching (HPAL) [1]. This method has been used in recent years and consists of wet process steps from start to finish without dry processes such as drying, roasting, etc. This is preferable in terms of energy and cost savings [2].

Metal recovery efficiencies for lateritic ores in the HPAL method are quite high compared to other methods. In this process, neutralization is performed after leaching and in the next stage, CCD (Counter Current Decantation) circuits are used to recover the pregnant solution in the leach residue. The basis of the CCD process is to increase the concentration by precipitating the solid particles in the suspension and to wash the pregnant solution in this sludge flowing in one direction by diluting it in several stages with wash water in the opposite direction. The number of stages of this process, i.e. the number of tanks, is determined by the soluble precious metal content of the underflow stream. [3]. If no other recovery process is applied to the underflow of the final thickener of CCD circuit, it is usually transferred to the tailings dam as final waste. Therefore, washing and settling efficiency in this unit is important. Polymeric flocculants are commonly used

in solid-liquid separation operations [4]. A typical laterite CCD circuit includes seven stages and recovers 99% of the dissolved nickel back to the clarified pregnant leach solution [5].

Flocculation is defined as the breaking of the stabilization between the solid particles in a suspension by means of a flocculant chemical so that the particles come together and reach a larger size. Flocculation can generally be regarded as a two-stage process including the formation of flocs and the growth period of flocs [6]. Polyelectrolytes used as flocculants in practice mainly include water-soluble polyacrylamides, polyphosphates and modified natural polymers (gelatins, chitosan and carrageenan as well as starch and cellulose derivatives). Polyelectrolytes are classified as cationic, anionic and nonionic according to the nature of the functional groups along the polymer chain. A polyelectrolyte is characterized by its molecular weight, the nature of the functional group and the charge density. The coagulation (destabilization of the colloid by neutralization) and flocculation (bridging between particles) potential of the polyelectrolyte is an important consideration in polyelectrolyte selection. The pH is also an important parameter to consider [7].

There are many studies investigating the effect of flocculation on the according to changing parameters or the effect of

flocculants with different properties on the process. In a study investigating the effect of flocculant ionicity and different molecular weights on the flocculation characteristics of chromite process ore tailings; it was observed that there was no change in the settling rate of nonionic type flocculant due to dosage increase, but the settling rate of anionic and cationic flocculants was directly proportional to dosage, and polymer ionicity had a significant effect on flocculation rate, settling and consolidation rate. It was also found that low anionic and low molecular weight anionic flocculants showed improved flocculation properties, while cationic flocculants performed better at higher cationicity and molecular weight, and nonionic flocculant did not have any flocculation effect on the tailing material. [8]. It was reported that anionic flocculants performed better than cationic and nonionic flocculants in terms of settling rate and provided positive results even at low dosages on coal washing plant tailings [9]. Other study is about characterizing fine-particle coal tailings and using an anionic, high molecular weight flocculant, the optimum slurry solids content was determined as 8% and pH value as 8. The decrease in settling rates at higher pHs was explained as the suspension pH changes the charge properties of the polymer chain and its compatibility with the solution, which directly affects the floc forming power of the polymer and may lead to a change in the settling rate of the particles. It was noted that a clearer overflow was obtained with increasing flocculant dosage, but there was no visible change after a certain dosage and at the same time, the amount of waste solids increased considerably [10]. It is reported by Göçer that another group of materials in which anionic flocculants give positive results are clay minerals such as kaolin, Na-Bentonite, Ca-Bentonite and intermediate type (Na,Ca)-Bentonite [11]. It is stated that the reason for this situation is the polymer bridging mechanism that allows the particles to come together by clustering. There is also an investigation on the electro kinetic properties and flocculation of clays, it was determined that although the surface charge of all clay minerals was found to have negative valence as a result of the measurements, the flocculant that gave the most positive result was again anionic. As the flocculant dosage increased, flocculation was better, but no change was observed after a certain amount of increase. It was observed that the settling velocity of the anionic flocculant decreased at high pH values, and the reason for this was that the suspended solid particles repelled each other as a result of the increase in pH value and reached a more stable position [12]. In a study investigating the settling characteristics of very fine particle iron ore slurry, a combination of anionic and cationic flocculants at a ratio of 4:1 was tested as well as flocculants separately. When the results were evaluated according to different dosages and pH, it was observed that the anionic flocculant performed better than other types of flocculants and the settling rate increased with increasing dosage. At the same time, the reason for the good performance of anionic flocculants was shown to be the positive surface charge of the material used for the test, and it was concluded that if polyacrylamide is used, it can significantly increase the settling rate or ratio and therefore it can be used practically for the settling process [13].

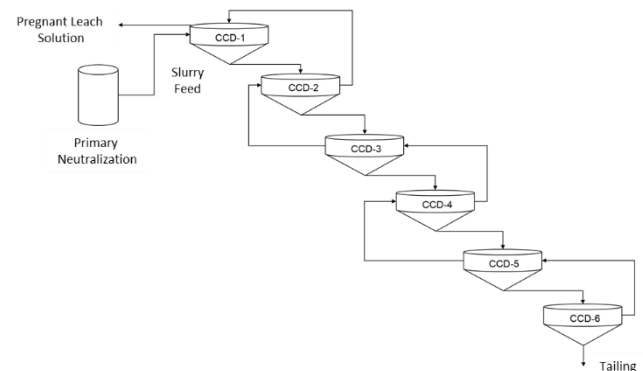
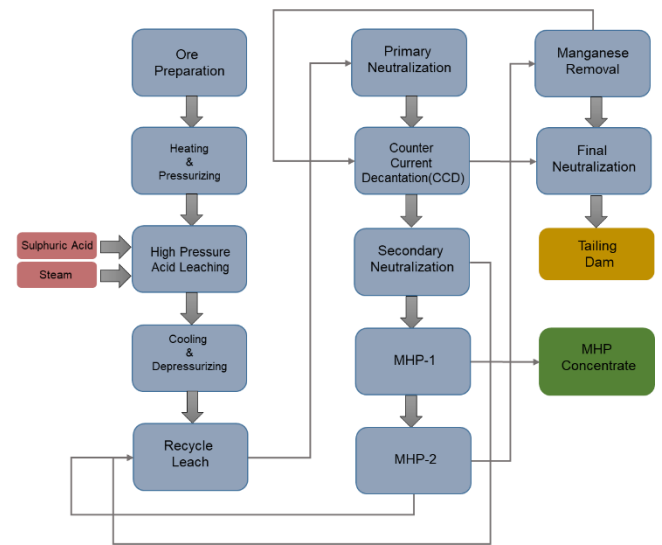
Solid liquid separation and washing efficiency in this process are of high importance in terms of obtaining the pregnant solution after HPAL with minimum loss by washing in CCD stages. For this reason, flocculant selection also becomes an important factor. The processing of two different lateritic nickel ores in the plant results in different precipitation behavior. Therefore, the aim of this study is to determine the

settling characteristics for both ores using a wide range of flocculants with different properties and to determine the flocculant that provides the best conditions according to the performance criteria and to evaluate the settling behavior in the CCD process.

Material and Method

The tests were performed for two different ore types, Manisa-Gördes and Eskişehir-Karaçam, due to the reason that two ore types are fed to the plant. Therefore, both Gördes and Karaçam ores were used as samples, with the slurry sample fed to the CCD thickeners and the overflow solution of the second CCD thickener for dilution. The flow diagram of the plant and the operation diagram of the CCD unit are given in Figure 1.

(a)



(b)

Figure 1. (a) Plant Flow Diagram (b) CCD circuit

Physical, chemical, and mineralogical characterization studies were carried out for all test samples in order to determine the characteristics and content of the slurry sample taken from the primary neutralization area and to examine its effect on the settling performances. In this context, the particle size distribution of both Gördes and Karaçam ores were measured using the Mastersizer device. The mineral composition of both samples was analyzed by X-ray diffraction (XRD) method. The elemental content of the primary neutralization sample in both liquid and solid phases

was determined by ICP-OES method. Within the scope of the experimental method, a series of settling tests were performed with primary neutralization slurry sample and CCD-2 thickener overflow solution samples using anionic, cationic, and nonionic flocculants of various molecular weights. Gördes ore was used in Tests 1, 2 and 3 and Karaçam ore was used in Tests 4, 5 and 6. Slurry and solution sample temperatures were kept the same with the plant values. Temperature, pH and potential values were measured and monitored during the test. For each test, a stock flocculant solution was prepared at a concentration of 0.1% using plant process water as fresh solution. It was stirred with a magnetic stirrer for about 3 hours and completely dissolved.

The flocculants used were anionic, cationic, and nonionic, with anionicity ranging from 3% to 70% and cationicity ranging from 1.5% to 100%. The types and molecular weights of the flocculants used in the tests are given in Table 1.

Table 1. Properties of flocculants used in the tests

Flocculant	Ionicity %	Type	Molecular Weight
FA 920	0	Nonionic	Medium
FA 920 SH	0	Nonionic	High
FA 920 VHM	0	Nonionic	Very High
AH 912	1	Low anionic	Medium
AH 912 SH	1	Low anionic	High
AN 905	5	Low anionic	Medium
FO 4125 SH	2.5	Low cationic	Medium
FO 4650 SH	55	Very high cationic	Medium
FO 4700 SH	70	Very high cationic	Medium
FO 4800 SH	80	Very high cationic	Medium
FO 4990 SH	100	Very high cationic	Medium
FO 4115 SSH	1.5	Low cationic	High
FO 4650 SSH	55	Very high cationic	High
FO 4700 SSH	70	Very high cationic	High
FO 4800 SSH	80	Very high cationic	High

Preliminary tests were carried out with a high molecular weight nonionic flocculant to determine the optimum solid percentage and flocculant dosage to be used as a constant condition in all settling tests for both ore types. In these tests, solid percentages of 5%, 7% and 10% and flocculant dosages of 560 g/t, 850 g/t and 1130 g/t were determined for both ores and the settling performances such as settling time, compaction and clarity were compared. When the results were examined, although the values seemed positive in terms of 5% solids rate, it is not a reason for preference because the settling rate was too fast. Considering the current design and capacity of the plant, it is possible that a very fast settling rate may lead to accumulation in the thickener and destabilization of the system as a result of insufficient underflow discharge of the thickener. Concerning the determination of flocculant dosage, 850 g/t and 1130 g/t provided very similar settling times. At this point, 850 g/t was accepted as the optimum value based on the consumption amount. It was concluded that the optimum operating conditions for both ores were 7% solids ratio and 850 g/t flocculant dosage. The pH and potential measurements of the settling tests performed under these operating conditions are given in Table 2.

Table 2. Operating conditions of the diluted slurry sample prepared for the settling test

	Primary Neutralization + CCD-2 (Diluted Slurry)			
	pH	Potential (mV)	Flocculant Dosage (g/t)	Solid Content (%)
Test1	3.29	392.5	850	7
Test2	3.53	512.5	850	7
Test3	3.60	513.0	850	7
Test4	3.35	296.7	850	7
Test5	3.38	510.7	850	7
Test6	3.43	504.9	850	7

All settling tests were made using a 500 mL volume measuring cylinder and plunger. The plunger is like a piston, its end is round and 2-dimensional also has holes in this part. It is used to mix the slurry and flocculant in the cylinder by up and down movement. The primary neutralization slurry was diluted with CCD-2 thickener overflow solution to a slurry solid content of 7%. Flocculants were grouped according to their molecular weights and ionic properties and settling tests were performed in sets. Flocculant dosing was carried out in two stages to represent the plant's thickener dosing and slurry mixing system. Mixing was carried out between both dosing with a plunger apparatus After dosing, 450- 300 mL, the settling times were recorded with a stopwatch and the volumetric compaction values of the settled solids after 30 minutes were determined. To determine the clarity value, suspended solids (SS) were measured by taking a sample from the clean solution. The mentioned procedure was applied to both ore types with three repetitions.

Ore Characterization

The nickel laterite deposits in the Gördes and Karaçam area are developed on serpentinites and peridotites which are interlayered in an Upper Cretaceous sedimentary package of limestone and associated sediments. Both ores are of limonitic type.

According to XRD analysis of Gördes and Karaçam samples, the major minerals in Gördes ore are quartz, gypsum, pyroxene, hematite and calcite, while Karaçam ore consists of goethite, hematite, cristobalite and Mg containing compounds.

The solid and liquid analysis results of the primary neutralization slurry sample were determined for all six tests and the results are given in Table 3. It is seen that especially Fe, Ca and Al elements are present in the solid phase in both samples, and the Ni and Co content of Karaçam ore is higher than Gördes ore.

The particle size distributions of representative samples taken from each slurry sample drawn from the operating plant flow for settling tests are shown in Figure 2. According to this, especially below 300 μ m, Karaçam ore exhibits a much finer particle size distribution, p80:97 μ m, while this value is p80:136 μ m in Gördes ore.

Table 3. Solid and liquid elemental analysis of the primary neutralization sample used in all tests

	ICP-OES Results in Solid Sample								
	Al, %	As, %	Ca, %	Co, %	Cr, %	Fe, %	Mg, %	Mn, %	Ni, %
Test1	2.628	0.349	10.454	0.004	0.794	21.35	0.266	0.055	0.087
Test2	1.814	0.251	11.560	0.003	0.452	15.64	0.219	0.053	0.072
Test3	2.420	0.295	11.827	0.003	0.490	15.40	0.238	0.052	0.072
Test4	1.965	0.272	8.472	0.005	0.818	26.71	0.169	0.144	0.097
Test5	1.744	0.221	7.920	0.006	0.846	27.86	0.190	0.135	0.132
Test6	1.911	0.234	10.830	0.005	0.813	21.45	0.171	0.082	0.088

	ICP-OES Results in Liquid Sample								
	Al, %	Ca, %	Co, %	Cr, %	Fe, %	Mg, %	Mn, %	Ni, %	Si, %
Test1	0.937	0.068	0.014	0.035	0.045	0.927	0.129	0.293	0.034
Test2	0.670	0.077	0.013	0.016	0.020	1.313	0.118	0.286	0.022
Test3	0.700	0.066	0.014	0.013	0.026	1.184	0.121	0.326	0.021
Test4	1.276	0.070	0.015	0.058	0.051	0.827	0.183	0.280	0.024
Test5	1.117	0.070	0.018	0.064	0.062	0.747	0.168	0.313	0.033
Test6	1.272	0.079	0.016	0.053	0.028	0.892	0.136	0.298	0.033

The important part in the results is the nickel content in the liquid. As the nickel in the liquid increases, the importance of the washing efficiency in the CCD increases in terms of losses. Flocculation is also an important factor affecting the washing efficiency.

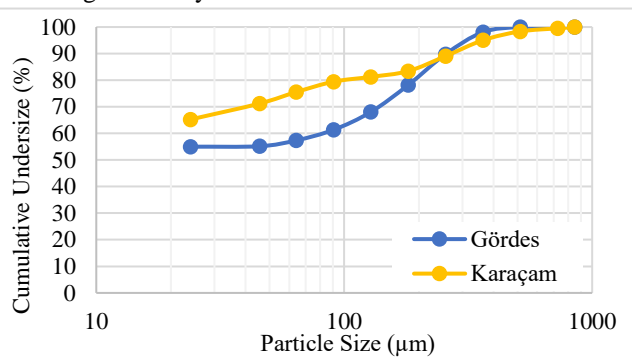


Figure 2. Particle size distribution of Gördes and Karaçam ore

The optimum value ranges of the performance parameters were determined for the purpose of interpreting the settling tests and are given in Table 4. Range values were determined according to the optimum process conditions based on plant design values. The results obtained were interpreted based on these values.

Table 4. Optimum value ranges of evaluation parameters

Parameter	Optimum Range
Settling time (s)	10-30
Compaction (mL)	100-130
Thickener U/F Solid (%)	30-35
Suspended Solids (SS) (mg/L)	100-200

Results and Discussion

With the completion of the test studies, the settling performances of the flocculants were evaluated for both ore types based on all measured and recorded data. The parameters obtained from the tests such as settling time, volumetric compaction, clarity, which elucidate the performance evaluation, were examined. Nonionic, anionic and cationic flocculants were grouped separately, and all tests

were compared with each other. To ensure reliability the tests were repeated, and evaluation was made with average results.

Tests performed with Nonionic Flocculants

Tests were conducted for both Gördes and Karaçam samples using flocculants with different molecular weights. Data on settling times are given in Figure 3.

When the settling times for Gördes ore were analyzed, it was seen that FA 920 and FA 920 SH flocculants gave similar settling trend in the three tests. However, there is a noticeable difference in the performance of FA 920 VHM flocculant in terms of settling time in test No. 2 and it is seen that it provides very fast settling times in other tests. In Karaçam ore, although the settling rates were generally very high, an optimum settling rate was reached only in test No. 6.

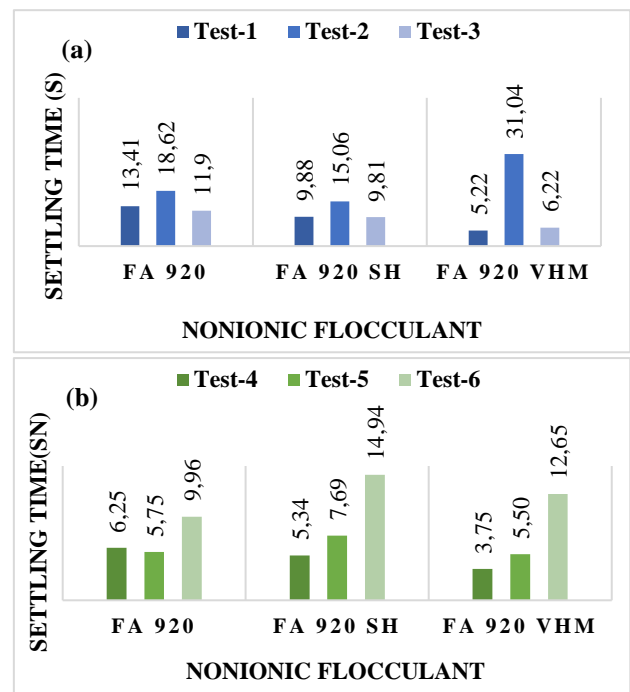


Figure 3. Settling times with nonionic flocculants a) Gördes b) Karaçam

Although settling time is an important criterion for the evaluation in the first stage, the amount of compaction of the settled solid, underflow (U/F) solid ratio and clarity are also important parameters and the values of nonionic flocculants obtained for both ores are summarized in Table 5. When the volumetric compaction of the settled solid for Gördes ore was examined, it was seen that FA 920 flocculant gave reasonable results in all tests. FA 920 SH and FA 920 VHM flocculants had high compaction amounts for test results No. 2 and No. 2 and 3, respectively. When the Karaçam ore results are evaluated, it is seen that the compaction amounts are acceptable for all tests. The low volumetric compaction indicates that the solid ratio in the underflow of the thickener will remain at high values. This is a desirable situation for a successful solid liquid separation and CCD operation.

The underflow solids by mass ratio values are calculated based on the volumetric compaction amounts obtained as a result of the tests and provide better information as a performance indicator. Acceptable solid by mass ratio for this plant condition CCD thickener underflow is in the range of 30%-35%. These values may vary according to plant design and operating conditions. When these values are considered, it is seen that there is a difference between Gördes and Karaçam ores in terms of the underflow density of nonionic flocculants and Karaçam ore has a very positive effect. When the clarity results for Gördes ore were analyzed, it was determined that FA 920 flocculant SS values were close to the limit. When a comparison was made according to molecular weights, it was observed that a clearer overflow solution was obtained due to the increase in molecular weight.

Table 5. Other settling parameters using nonionic flocculants

		Gördes			Karaçam		
		Test1	Test2	Test3	Test4	Test5	Test6
Compaction (mL)	FA 920	119	120	126	100	98	115
	FA 920 SH	121	138	130	110	95	115
	FA 920 VHM	130	138	140	110	105	125
U/F % Solid	FA 920	31.7	31.4	30.2	36.5	37.1	32.6
	FA 920 SH	31.2	27.9	29.4	33.8	38.1	32.6
	FA 920 VHM	29.4	27.9	27.5	33.8	35.1	30.4
SS (mg/L)	FA 920	172	255	202	183	235	100
	FA 920 SH	142	112	140	132	130	63
	FA 920 VHM	69	136	87	105	80	66

Under the mentioned test conditions and in cases where overflow clarity values are high, it is predicted that SS amounts can reach an acceptable value by increasing the flocculant dosage, but it should also be taken into consideration that the consumption amount will increase. The same situation is also valid in Karaçam ore, and it was observed that a clearer overflow solution was formed with the increase in molecular weights. It can be said that in the test results of nonionic flocculants 4 and 5, the overflow SS values were slightly high due to the very fast settling time.

Tests performed with Anionic Flocculants

As a result of the settling tests performed with anionic flocculants of different molecular weights and anionicity grades, only flocculants with low and very low anionicity achieved results. Flocculants with medium or high anionicity were observed to interact with the slurry, but no flocculation occurred to show the settling effect. Data on settling times are given in Figure 4.

AH 912 flocculant gave positive results by providing fast settling time in all test conditions for the first three tests. AH 912 SH flocculant, which has a higher molecular weight, provided a slower settling time compared to AH 912 flocculant and there is a big difference in terms of settling time in test No. 3 results. A similar situation was observed for AN 905 flocculant, which showed a very slow settling performance in tests 1 and 2 but was faster in test 3. For Karaçam ore, there were different and inconsistent results between the tests. The effect of AN 905 flocculant on settling performance was negative in all tests. Even if it has a positive result in terms of compaction or clarity, the settling time gives a better insight when evaluating its performance. In test No.

6, the effect of all anionic flocculants on settling time was slower than the other test results.

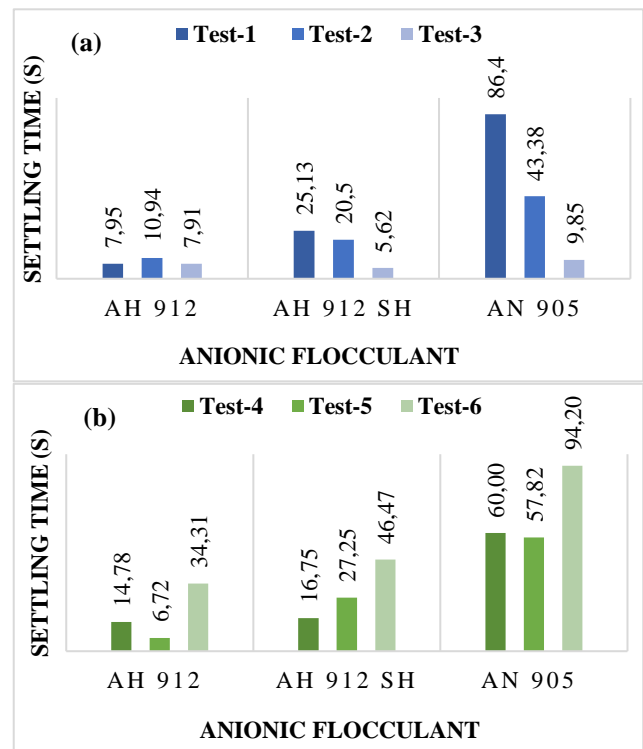


Figure 4. Settling times with anionic flocculants a) Gördes b) Karaçam

Although the settling time of AH 912 flocculant was acceptable in all tests, the compaction was optimum only for test No. 1 (Table 6). AH 912 SH flocculant, on the other hand,

showed high values in terms of the compaction despite acceptable settling times. The AN 905 flocculant gave results with appropriate compaction amounts in tests 1 and 2. However, due to ineffective settling in test No. 3, impurity occurred in the overflow and therefore the amount of solids settled decreased. For this reason, the compaction value

seems to be within reasonable ranges. This proves that all parameters should be analyzed in combination [14]. Similar to nonionic flocculants, anionic flocculants did not give a stable and positive result in the mass solids content of the underflow for Gördes ore, while they were generally successful for Karaçam ore.

Table 6. Other settling parameters using anionic flocculants

		Gördes			Karaçam		
		Test1	Test2	Test3	Test4	Test5	Test6
Compaction (mL)	AH 912	120	130	140	100	99	115
	AH 912 SH	121	140	149	101	94	110
	AN 905	120	121	140	95	97	105
U/F % Solid	AH 912	31.5	29.4	27.5	36.5	36.8	32.6
	AH 912 SH	31.2	27.5	26.0	36.3	38.4	33.8
	AN 905	31.5	31.2	27.5	38.1	37.4	35.1
SS (mg/L)	AH 912	83	135	81	280	92	89
	AH 912 SH	114	87	54	149	178	81
	AN 905	478	143	51	144	261	296

Tests performed with Cationic Flocculants

In the case of cationic flocculants, it was observed that the storage time of the flocculants was too short, and they decomposed too fast, which negatively affected the settling performance. The settling test results were compared according to the average settling time and given in Figure 5.

According to the results of Gördes ore, it was observed that the settling times of all flocculants were close to each other

and at reasonable values. The same situation was also found for Karaçam ore; however, it was determined that flocculants with high molecular weight and very high cationic properties did not cause settling effect in test No. 4 and gave successful results in other tests. On the other hand, it was also determined that there were differences between the tests in terms of settling time.

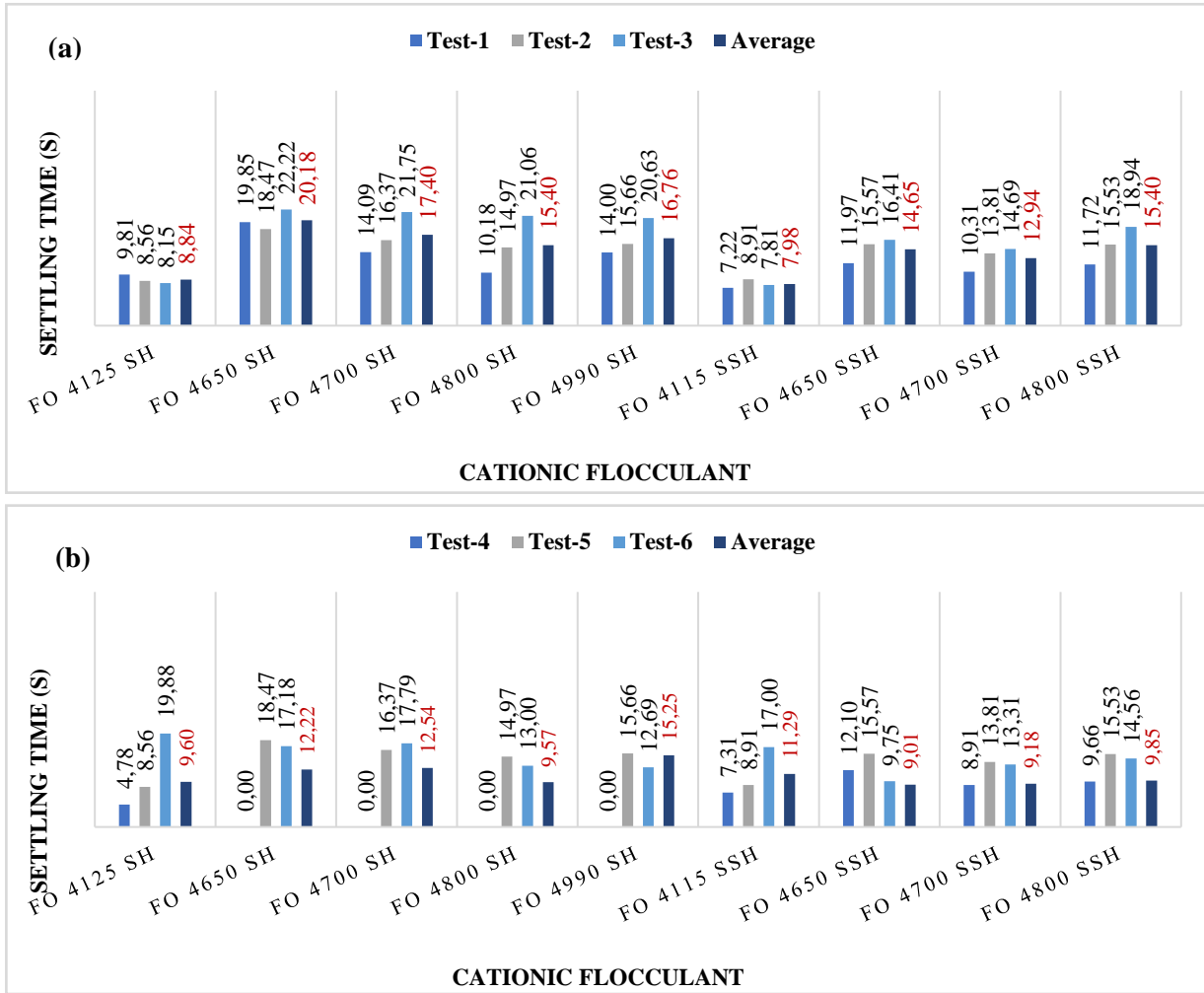


Figure 5. Settling times with cationic flocculants a) Gördes b) Karaçam

Although the settling times gave positive results in general, the volumetric compaction, especially in Gördes ore, were very high and did not show an effective compaction (Table 7). Since the flocculation formed after flocculant dosing was very coarse, it was observed that the voids between the settling material were high and thus the compaction was not too much. In Karaçam ore, it was observed that the results of

test No. 4 and 5 showed positive results, but in test No. 6, except for the flocculants with low cationicity, the other flocculants had high compaction. For Gördes ore, the underflow solid content of the thickener was below 30%, which was a negative situation for settling and CCD process performance. For Karaçam ore, although the results were inconsistent, values of 30% and above were recorded.

Table 7. Other settling parameters using anionic flocculants

	Gördes			Karaçam			
	Test1	Test2	Test3	Test4	Test5	Test6	
Compaction (mL)	FO 4125 SH	131	136	140	120	100	121
	FO 4650 SH	135	150	150	0	110	135
	FO 4700 SH	150	155	155	0	115	132
	FO 4800 SH	155	160	165	0	125	137
	FO 4990 SH	165	170	171	0	110	148
	FO 4115 SSH	135	145	140	110	100	119
	FO 4650 SSH	140	155	155	115	111	140
	FO 4700 SSH	145	160	155	115	120	135
	FO 4800 SSH	150	165	165	120	130	136
U/F % Solid	FO 4125 SH	29.2	28.2	27.5	31.5	36.5	31.2
	FO 4650 SH	28.4	25.9	25.9	0	33.8	28.4
	FO 4700 SH	25.9	25.1	25.1	0	32.6	29.0
	FO 4800 SH	25.1	24.4	23.7	0	30.4	28.1
	FO 4990 SH	23.7	23.1	22.9	0	33.8	26.2

	FO 4115 SSH	28.4	26.7	27.5	33.8	36.5	31.7
	FO 4650 SSH	27.5	25.1	26.7	32.6	33.6	27.5
	FO 4700 SSH	26.7	24.4	25.1	32.6	31.5	28.4
	FO 4800 SSH	25.9	23.7	23.7	31.5	29.4	28.2
SS (mg/L)	FO 4125 SH	65	106	117	100	95	86
	FO 4650 SH	41	76	16	0	54	45
	FO 4700 SH	48	75	15	0	55	46
	FO 4800 SH	53	86	28	0	69	34
	FO 4990 SH	108	85	57	0	144	36
	FO 4115 SSH	66	87	82	97	93	56
	FO 4650 SSH	51	81	35	78	46	32
	FO 4700 SSH	45	73	36	38	60	41
	FO 4800 SSH	41	85	21	50	72	47

All test results are summarized in Table 8 according to which parameter is within the optimum value ranges.

In the settling tests with Gördes ore, the settling rate of nonionic flocculants was acceptable at medium and high molecular weights but showed a faster settling rate with very high molecular weight nonionic flocculants. This is an exception only for Test 2. In most flocculant applications higher molecular weight results in better settling efficiency. However, increasing molecular weight can lose its effectiveness after a certain point. High molecular weight flocculants are generally more viscous and are not easily dispersed in suspension. Since adsorption is very fast, a loss of activity occurs. With increasing molecular weight, the number of polymer chains per weight unit decreases and this can affect flocculant performance [15]. The overflow solution clarity of medium and high molecular weight nonionic flocculants has a high SS value, especially when compared to cationic flocculants. It was observed that the floc sizes formed had a small structure. Considering that molecular weights are parallel to the chain length of polymers, this can be expected Table 8. Summarized performance data

to occur. Accordingly, this is seen as the main reason for the low clarity and compaction amounts. Due to the large size of the flocs formed by the very high molecular weight FA 920 VHM flocculant, the settling rate was high especially in tests 1 and 3 and therefore the compaction did not give good results. In the case of anionic flocculants, only flocculants with very low ionicity (close to nonionic) gave results. No flocculation was observed due to the increase in ionicity or molecular weight. Only visually there was an interaction between the solid particles and the flocculants, but it had no effect on the settling. At pH 4 and lower, nonionic flocculants perform best. In this pH range, anionic flocculants coil like nonionic flocculants but their activity is very low. This is because the amide groups in nonionic flocculants are replaced by inert carboxyl groups, which reduce the number of hydrogen bonding sites present in the flocculant structure at low pH. Thus, flocculants without any ionicity perform better at a lower pH range [15]. This explains why nonionic and low anionic flocculants produce flocculation but do not show any effect with increasing ionicity.

Flocculant	Type	Molecular Weight	Settling Time	GÖRDES			KARAÇAM		
				Clarity	Compaction	Settling Time	Clarity	Compaction	
FA 920	Nonionic	Medium	✓	X	✓	✓	✓	✓	
FA 920 SH	Nonionic	High	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
FA 920 VHM	Nonionic	Very High	✓	✓	X	✓	✓	✓	
AH 912	Anionic	Medium	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
AH 912 SH	Anionic	High	✓	✓	X	✓	✓	✓	
AN 905	Anionic	Medium	X	X	✓	✓	X	✓	
FO 4125 SH	Low Cationic	Medium	✓	✓	X	✓	✓	✓	
FO 4650 SH	Very High Cationic	Medium	✓	✓	X	✓	✓	✓	
FO 4700 SH	Very High Cationic	Medium	✓	✓	X	✓	✓	✓	
FO 4800 SH	Very High Cationic	Medium	✓	✓	X	✓	✓	✓	
FO 4990 SH	Very High Cationic	Medium	✓	✓	X	✓	✓	✓	
FO 4115 SSH	Low Cationic	High	✓	✓	X	✓	✓	✓	
FO 4650 SSH	Very High Cationic	High	✓	✓	X	✓	✓	✓	
FO 4700 SSH	Very High Cationic	High	✓	✓	X	✓	✓	✓	
FO 4800 SSH	Very High Cationic	High	✓	✓	X	✓	✓	✓	

In the studies performed with Karaçam ore, results close to Gördes ore were obtained. Nonionic flocculants with low and medium molecular weights generally provided a fast settlement and for this reason, a very clear solution could not

be obtained. There is a direct correlation between the molecular weights and the size of the flocs formed, with the higher molecular weight flocculants forming larger flocs. Although settling rate and clarity parameters are affected by

floc structure, they are primarily related to floc size distribution. The rapid settling rate associated with low clarity is often related to the bi-shaped floc size distribution resulting from poor flocculation and, in particular, the failure to achieve adequate destabilization prior to the application of high molecular weight flocculants [16]. An overall analysis of all tests for both ores showed that medium and high molecular weight nonionic flocculants showed the most consistent and positive results with respect to performance criteria such as settling time, clarity and compaction, as well as compared to anionic and cationic flocculants.

Laterite ore is defined as a complex and highly swellable ore [17]. Nevertheless, this definition should not be considered as a general definition for all laterites [18]. The fact that the ore structure fed to the plant is very variable, the process controllability is difficult and at the same time there are instantaneous changes in the system continuously caused the test results with the same type of flocculants to be different from time to time. Since the tested slurry is leached, it is very likely that the ore rheology will change due to changing leaching mechanisms and mineralogy. For this reason, the differences in pH, potential and elemental content between the working conditions of the tests also changed the adsorption mechanism of the flocculants and prevented the tests from producing close results.

Conclusion

Following results can be deduce

✓ In both ores, nonionic flocculants performed better and provided more stable results than other types of flocculants.

✓ Anionic flocculants with very low anionicity showed positive results, however, as the molecular weight and anionicity grade increased, an effective flocculation did not occur.

✓ Clarity values with cationic flocculants have given very good results and generally provided a fast settling. For this reason, it is predicted that the amount of consumption can be reduced especially by using high molecular weight cationic flocculants. However, the compaction should also be taken into consideration. Cationic flocculants are not preferred in Gördes ore due to the low solid content.

✓ As a result of the fact that the ore content is not stable and there are many parameters in the process where instantaneous changes occur, it is concluded that the settling behavior is open to variability.

✓ Although it was not clearly demonstrated that pH and potential values have a direct effect on flocculation characteristics, it was concluded that changes in these parameters may cause differences between test results.

Declaration of Competing Interest

"There is no need to obtain ethics committee permission for the prepared article"

"There is no conflict of interest with any person/institution in the prepared article"

Author contributions

Keskin: Data collection, Data analysis and interpretation, Draft creation, Revision.

Can: Study concept, Analysis and interpretation of data, Draft creation.

Acknowledgement

The authors wish to thank Meta Nickel Cobalt Mining Industry and Trade Plc. for providing the samples and for helping with the chemical analyses.

References

- [1] F.K. Crundwell, M.S. Moats, V. Ramachandran, T. G. Robinson, W. G. Davenport, "Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum Group Metals", Elsevier, Amsterdam, 2011, Chapter 1, pp. 1-18.
- [2] Shibayama et al., U.S. Patent 8343447B2, 2013
- [3] M.C. Mulligan and L. Bradford, "Soluble metal recovery improvement using high density thickeners in a CCD circuit: Ruashi II case study", in *Fifth Southern African Base Metals Conference 27-31 July 2009, Kasane, Botswana*, 2009, 259-268
- [4] P. J. Scales, A. Kumar, B. B. G. van Deventer, A. D. Stickland, S. P. Usher, "Compressional dewatering of flocculated mineral suspensions", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 93, Issue 3, pp. 549-552, 2014.
- [5] M. S. Moats and W. G. Davenport, "Nickel and Cobalt Production", in *Treatise on Process Metallurgy: Industrial Processes, Part A*, Elsevier, UK, 2014, Chapter 2.2, pp. 625-667.
- [6] R. Hogg, "Flocculation and Dewatering of Fine-Particle Suspensions", *Coagulation and Flocculation*, 2nd. Edition, CRC Press, 2005, Chapter 12, pp.806-847.
- [7] B. M. Baraniak, E. Walerińczyk, "Flocculation", in *Encyclopedia of Food Science, Food Technology and Nutrition*, Academic Press, 1993, pp. 2531-2535.
- [8] R.K. Dwari, S.I. Angadi, S.K. Tripathy, "Studies on flocculation characteristics of chromite's ore process tailing: effect of flocculants ionicity and molecular mass", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 537, pp. 467-477, 2018, DOI:10.1016/j.colsurfa.2017.10.069.
- [9] H. Çiftçi, S. Işık, "Farklı anyonik, katyonik ve noniyonik flokülantların ince boyutlu lavvar tesisi atıklarının çökeltme davranışlarına etkileri", *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Cilt 21, Sayı 1, pp. 13-19, 2017.
- [10] S. Kumar, S.Bhattacharya, N.R. Mandre, "Characterization and flocculation studies of fine coal tailings", *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 114, 11, pp. 945-949, 2014.
- [11] M. Göçer, Kil minerallerinin flokülasyon ve koagülasyon işlemleri ile çöktürme karakteristiklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2016.
- [12] A. Demiral, Killerin elektrokinetik özellikleri ve flokülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2013.

- [13] C. Eswaraiah, S.K. Biswal, B.K. Mishra, "Settling characteristics of ultrafine iron ore slimes", *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 19, Number 2, pp. 95-99, Feb 2012, DOI: 10.1007/s12613-012-0521-6.
- [14] Ö. Keskin, Gördes ve Karaçam Lateritik Nikel Cevherlerinin YBAL Sonrası CCD Prosesinde Çökme Davranımının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2019
- [15] J. Pillai, "Flocculants and Coagulants: The Keys to Water and Waste Management in Aggregate Production", Nalco Company, Illionis, Reprint R-680,1997.
- [16] R. Hogg, "Flocculation and Dewatering", *Int. J. Miner. Processing*, vol. 58, issues 1-4, pp. 223-236, 2000, DOI: 10.1016/S0301-7516(99)00023-X.
- [17] R.M. Turian, T.W. Ma, F.L.G. Hsu, D.J. Sung, "Characterization, settling, and rheology of concentrated fine particulate mineral slurries", *Powder Technology*, vol. 93, pp. 219-233, 1997.
- [18] S. Farrokhpay, L. Filippov, "Aggregation of nickel laterite ore particles using polyacrylamide homo and copolymers with different charge densities", *Powder Technology*, vol. 318, pp. 206-213, 2017.



Araştırma Makalesi / Research Article

Bazalt Agregata Üretim Tesisinde Fine-Kinney, HRNS ve John-Ridley İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirme Yöntemlerinin Uygulamalı Karşılaştırılması

*Comprehensive Comparison of Fine-Kinney, HRNS and John-Ridley Risk Assessment Methods in an Actual Basalt Aggregate Production Plant*Özgür Akkoyun^{1*}, Mehmet Yasin Fidan²¹ Dicle Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, oakkoyun@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9103-8300>² Bağlar Belediyesi Diyarbakır, yasinfidan21@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8861-8419>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 20.12.2023
Revizyon 12.01.2024
Kabul 15.01.2024
Online 29.03.2024

Anahtar Kelimeler:

Bazalt, İSG, Fine-Kinney, HRNS, Ridley

ÖZ

Bu çalışmada bir bazalt agregata üretimi entegre tesisinde iş sağlığı ve güvenliği risklerinin Fine-Kinney, HRNS ve John Ridley risk değerlendirme metotları kullanılarak risk değerlendirmesi karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışmada Fine-Kinney, HRNS ve John Ridley risk değerlendirme yöntemleri ayrı ayrı uygulanarak kaza önleme ve kaza kontrolü için değerlendirmeler yapılmış, işyerinde bulunan çalışan sayısı dikkate alınarak işyeri riskleri değerlendirilmiş, kazaların belirlenmesi ve belirlenen süre içinde önlem alınması için gerekli risk faktörleri değerlendirilmiştir. Maden işyerlerinde ortaya çıkan risk ve tehlikelerin çok önemli olduğu ve çalışanların durumu göz önüne alındığında bu risklerin en kısa süre içerisinde önlenmesi veya ortadan kaldırılması çok önemlidir. Bu sebeple maden işyerinin durumu dikkate alındığında tespit edilen riskler için bir an önce önlem alınması gerektiği düşünülürse John Ridley metodunun madencilik, agregata üretimi ve kırma eleme tesisleri gibi işyerlerinde diğer yöntemlere göre daha iyi sonuçlar verdiği bulunmuştur.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 20.12.2023
Received in revised form 12.01.2024
Accepted 15.01.2024
Available online 29.03.2024

Keywords:

Basalt, OSH, Fine-Kinney, HRNS, Ridley

ABSTRACT

In this study, Fine-Kinney, HRNS, and John-Ridley risk assessment methods are comprehensively compared by using them in an actual basalt aggregate production integrated facility. Fine-Kinney, HRNS, and John-Ridley risk assessment methods were applied separately and evaluations were made for accident prevention, workplace risks were evaluated by taking into account the number of employees in the workplace, and the necessary risk factors were evaluated to identify accidents and take precautions within the specified period. The mining industry is one of the most dangerous industries and considering the risks and dangers that occur in mining workplaces are very important and the situation of the employees, it is very important to prevent or eliminate these risks as soon as possible. At the end of the study, it was found that the John-Ridley method gives better results than other methods and can be offered for workplaces such as mining, aggregate production, and crushing and screening facilities.

Doi: 10.24012/dumf.1406953

* Sorumlu Yazar

1. Giriş

6331 sayılı İSG (İş Sağlığı ve Güvenliği) kanunu birçok yenilik getirmiştir, kanunun getirdiği en büyük yeniliklerden birisi de kanunun 4.madde c fıkrasında işverenin genel yükümlülüğünde “risk değerlendirmesi yapar veya yaptırır” ifadesi bulunmaktadır. Kanunun amacı ülkemizde yaşanan iş kazalarının azaltılması, çalışanların sağlıklı ve koşulları iyileşen çalışma koşullarında çalışmalarını sağlamaktır. 6331 sayılı kanun bu zorunluluğu getirirken risk değerlendirmesinin hangi yöntem kullanılarak yapılacağı hakkında bir koşul ortaya koymamış sadece sınırları çizmiştir. Hal böyle olunca da kanunun yürürlüğe girdiği 2013 yılından bugüne hemen her sektör deneme yanılma yoluyla kendi özel koşullarına uygun risk değerlendirme yol ve yöntemlerini bulmaya çalışmaktadır.

Bu çalışmada agrega sektöründe hangi risk değerlendirme yönteminin daha başarılı sonuçlar vereceğini araştırarak literatüre ve sektöre katkı sağlanması amaçlanmaktadır. Bu amaç için uygulama yeri olarak, Diyarbakır ili Merkez ilçesine bağlı olan Bağlar Belediyesi’ne ait bazalt agrega kırma eleme tesisi seçilmiş ve Fine-Kinney, Hazard Rating Number System (HRNS) metodu ve John-Ridley risk değerlendirme yöntemleri ayrı ayrı kullanılarak karşılaştırmalı bir analiz yapılmıştır.

Taş ocaklarında ve kırma eleme tesislerinde üretilen agrega malzemelerin birçok kullanım alanı vardır. Bu alanların başında inşaat sektörü gelmektedir. Agregası; her türlü bina inşaatında, yollarda, köprü yapımında, barajlarda ve altyapı faaliyetlerinin olduğu birçok sektörde kullanılmaktadır. Beton imalatı, asfalt üretimi ve çimento hammadde üretiminde önemli rol almaktadır.

Ülkemizdeki şehirlerin büyüme göstermesi ve genişlemesi sonucu nedeniyle inşaat sektöründeki yatırımların artmasına neden olmaktadır. Bu sebeple agrega üretimi de giderek yükselen bir büyüme sergilemektedir.

Taş ocakları ve kırma eleme tesisleri içinde var olan ya da dışarıdan gelecek tehlikelerin sonucunda ortaya çıkabilecek risklerin tespit edilmesi, analizleri yapılarak değerlendirilmesi ve kontrol önlemlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Risk değerlendirme çalışmaları; Fine-Kinney, HRNS ve John Ridley metodları ile yapılmıştır. İşyerindeki faaliyet alanlarına göre toplam 171 adet risk tespit edilmiştir. Belirlenen risklerin önlenmesi veya kaynağında engellenmesi için alınması gereken düzeltici ya da önleyici kontrol önlemleri belirlenmiştir.

2. Risk Değerlendirmesi

İşyerinde var olan ya da dışarıdan gelebilecek tehlikelerin tespit edilmesi, bu tehlikelerin riske dönüşmesine yol açan unsurlar ile tehlikelerden kaynaklanan risklerin analiz edilerek derecelendirilmesi ve kontrol tedbirlerinin kararlaştırılması amacıyla yapılması gerekli tüm çalışmalara risk değerlendirmesi denir (6331 İSG Kanunu) [1],[2].

Çalışmada Fine-Kinney metodu ile kaza önleme ve kaza kontrolü için matematiksel değerlendirmelerde bulunulmuştur. HRNS Metodu ile işyerinde bulunan çalışan sayısı dikkate alınarak işyeri riskleri değerlendirilmiştir. John Ridley metodu ile kazaların belirlenmesi ve belirlenen süre içinde önlem alınması için gerekli risk faktörleri değerlendirilmiştir.

Bazalt kırma eleme tesisi olan işyerinde belirlenmiş risklerin analizi yapılarak risk değerlendirme yöntemleri aracılığıyla risk değerlendirme tabloları hazırlanmıştır. İş sağlığı ve güvenliği çalışmaları açısından uygulamada kolaylık sağladığından genelde ilk tercih olarak Fine-Kinney yöntemi kullanılmaktadır. Bu çalışmada Fine-Kinney, HRNS ve John-Ridley yöntemleri kullanılarak üç yöntem için sonuçlar değerlendirilmiştir.

Bu çalışmanın amacı; çok tehlikeli işyerleri sınıfında bulunan madencilik iş kollarından biri olan agrega üretim tesislerinde risk değerlendirme yöntemi seçimine bir katkı koymaktır. Seçilen maden işletme tesisinde tespit edilen riskler üç farklı yöntem uygulanıp kıyaslama yapılarak en iyi ve uygun RD yönteminin bulunması amaçlanmıştır. Çalışmanın bir başka amacı ise çok bilinmeyen RD yöntemlerinden biri olan John Ridley yöntemi ve yöntemin madencilik alanında agrega tesislerinde uygulanmasında elde edilecek veriler hakkında bilgi vermektir.

2.1. Fine-Kinney Metodu

Fine-Kinney yöntemi, risklerin derecelendirmesi sonucunda hangi işlerin öncelikli yapılması ve kaynak aktarımının öncelikli olarak nerelere aktarılması hususunda kullanımı basit ve benimsenmiş bir yöntemdir. Risklerin realist değerlendirilebilmesi için tehlikeli vakaların olma ihtimali, meydana gelme ihtimali, meydana gelmesi halinde şiddetinin ne olacağı ve mevcut kontrol önlemleri bir bütün olarak ele alınmalıdır [3],[4].

Fine-Kinney metodunda, olasılık (O) (bir zarar veya hasarın zaman içinde meydana gelme olasılığı), Frekans (F) (tehlikeye maruz kalma sıklığı) ve Şiddet (Ş) (tehlikenin meydana gelmesi halinde insan, işyeri ve çevre üzerinde oluşturacağı hasarın ya da zararın şiddeti) skalalarından meydana gelmiş olup, risk skoru (R) aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$R = O \times F \times \text{Ş} \quad (1)$$

Eşitliği ile hesaplanır.

R = Risk değeri

O = Olasılık

F = Frekans

Ş = Şiddet

Tablo 1. Fine-Kinney olasılık, frekans ve şiddet değerleri

OLASILIK		FREKANS		ŞİDDET	
Olasılık Değeri	Zararın Gerçekleşme Olasılığı	Frekans Değeri	Tehlikeye Zaman İçinde Maruz Kalma Tekrarı	Şiddet Değeri	İnsan veya Çevre Üzerinde Yapacağı Tahmini Zarar
10	Beklenir kesin	10	Hemen hemen sürekli (bir saatte birkaç defa)	100	Birden fazla ölümlü kaza çevresel felaket.
6	Yüksek oldukça mümkün	6	Sık (günde bir, birkaç defa)	40	Öldürücü kaza ciddi çevresel zarar.
3	Olası	3	Ara sıra (haftada bir, birkaç defa)	15	Kalıcı hasar/yaralanma, iş kaybı/ çevresel engel oluşturma.
1	Mümkün fakat düşük	2	Sık değil (ayda bir, birkaç defa)	7	Önemli hasar/yaralanma, dış ilk yardım ihtiyacı/arazi sınırları dışında çevresel zarar.
0,5	Beklenmez fakat düşük	1	Seyrek (yılıda birkaç defa)	3	Küçük hasar/yaralanma, dahili ilk yardım /arazi içinde sınırlı çevresel zarar.
0,2	Beklenmez	0,5	Çok seyrek (yılıda 1 veya daha seyrek)	1	Ucuz atlatma çevresel zarar yok.

Tablo 1’de belirtilen veriler dikkate alınarak risk değerlerine göre yapılacak aksiyonların belirlenmesi gösterilmektedir. Risk değerlerine göre belirlenecek eylemler Tablo 2’de gösterilmektedir.

Risk değeri yüksekliğine göre alınacak önlemlerin öncelik düzeyi belirlenir ve risk düzeyine göre önem sıralaması yapılır [3],[4].

Tablo 2. Fine-Kinney risk değerlendirme sonuç tablosu

RİSK DEĞERİ	RİSK TANIMI	AÇIKLAMA
$400 \leq R$	Tolerans gösterilemez risk	Hemen gerekli önlemler alınmalı veya işin durdurulması, tesisin, binanın kapatılması vb. düşünülmelidir.
$200 \leq R < 400$	Esaslı risk	Kısa dönemde iyileştirilmelidir. Bir kaç ay içerisinde.
$70 \leq R < 200$	Önemli risk	Uzun dönemde iyileştirilmelidir. Yıl içerisinde.
$20 \leq R < 70$	Olası risk	Gözetim altında uygulanmalıdır.
$R < 20$	Önemsiz risk	Önlem öncelikli değildir.

2.2. Tehlike Derecelendirme Sistemi

HRNS (Hazard Rating Number System) yöntemi ise ilk olarak Haziran 1990’ da Chris Steel tarafından Sağlık Güvenlik Uygulayıcısı Dergisinde yayınlanmış ve bir tehlikeye maruz kalma olasılığı ve riskini, risk altındaki kişi ya da kişilerin sayısı ve olası zararını ölçerek, tehlike derecelendirme numaralarının ortaya koyduğu makalesi ile ifade edilmiştir [5].

HRNS yönteminde Fine-Kinney yönteminden bir adım daha ileri gidilerek etkileyecek kişi sayısı da bir parametre olarak eklenip risk skoru hesaplanmaktadır

$$HRN = O \times S \times \xi \times K \quad (2)$$

O = Olasılık Değeri,

S = Sıklık Değeri,

K = Kişi Sayısı Değeri

ξ = Şiddet Değeri

HRNS yönteminde risk değeri Tablo 3’te gösterilen parametreler ele alınarak yukarıda belirtilen formüle göre HRN değeri hesaplanmaktadır.

Tablo 3. HRNS olasılık, sıklık, şiddet ve kişi sayısı değerleri

OLASILIK		SIKLIK		ŞİDDET		KİŞİ SAYISI	
Olasılık Değeri	Olayın Meydana Gelme Olasılığı	Sıklık Değeri	Tehlikeli Bölgede Bulunma Sıklığı	Şiddet Değeri	Olası Yaralanmanın Şiddeti	Kişi Sayısı Değeri	Risk Altındaki Kişi Sayısı
0,03	Neredeyse	0,5	Yılda Bir	0,1	Sıyrık, ezik	1	1 – 2 Kişi
1	Çok Zor	1	Ayda Bir	0,5	Kesilme, yarılma	2	3 – 7 Kişi
1,5	Zor	1,5	Haftada Bir	1	Küçük kemik kırılması	4	8 – 15 Kişi
2	Olası	2,5	Günde Bir	2	Büyük kemik kırılması	8	16 – 50 Kişi
5	Mümkün	4	Saatte Bir	4	1 veya 2 parmak kaybı	12	50'den Fazla
8	Muhtemel	5	Sürekli	8	El, kol, bacak kaybı, kısmen görme veya işitme kaybı		
10	Yüksek			10	2 el kol bacak kaybı, tamamen görme veya işitme kaybı		
15	Kesin			12	Ciddi kalıcı hastalık		
				15	Ölüm		

Elde edilecek HRN değeri sonucunda Tablo 4'te belirtilen risk seviyelerine göre değerlendirme yapılmaktadır.

Tablo 4. HRNS risk değerlendirme

HRN DEĞERİ	RİSK SEVİYESİ	AÇIKLAMA
$1000 \leq \begin{matrix} H \\ R \\ N \end{matrix}$	Kabul Edilemez Risk	Risk ortadan kaldırılana ve azaltılana kadar iş durdurulmalı ve faaliyetlere ara verilmelidir.
$500 \leq \begin{matrix} H \\ R \\ N \end{matrix} < 1000$	Aşırı Yüksek Risk	Çok acil olarak emniyet tedbirleri alınmalı, yeterli kontrol tedbirleri alınmaya kadar ekipmanlar kullanılmamalı, insanlar uzak tutulmalı ve ilgili yönetim birimleri haberdar edilmelidir.
$100 \leq \begin{matrix} H \\ R \\ N \end{matrix} < 500$	Çok Yüksek Risk	Çok acil olarak emniyet tedbirleri alınmalıdır ve ilgili yönetim birimleri haberdar edilmelidir.
$50 \leq \begin{matrix} H \\ R \\ N \end{matrix} < 100$	Yüksek Risk	Acil olarak emniyet tedbirlerinin alınması gereken kadar potansiyel tehlike vardır. Bu tedbirler acil olarak uygulanmalıdır.
$10 \leq \begin{matrix} H \\ R \\ N \end{matrix} < 50$	Önemli Risk	Emniyet tedbirlerinin uygulanmasını gerektirecek seviyede risk vardır. İlk fırsatta bu tedbirler uygulanmalıdır.
$5 \leq \begin{matrix} H \\ R \\ N \end{matrix} < 10$	Düşük Risk	Az da olsa risk vardır. Emniyet tedbirleri için gerekli kontrol ekipmanlarının kullanılmasını önerilmelidir.
$1 \leq \begin{matrix} H \\ R \\ N \end{matrix} < 5$	Çok Düşük Risk	Sağlık ve güvenliği tehlikeye atan çok az risk var. İlave olarak kayda değer tedbirine gerek olmayabilir, Kişisel Koruyucu Donanımlar ve eğitimler ile risk azaltılabilir.
$0 < \begin{matrix} H \\ R \\ N \end{matrix} < 1$	İhmal Edilebilir Risk	Mevcut durumda sağlık ve güvenliği tehlikeye atacak risk yok, ilave tedbirlere ihtiyaç yok. Mevcut önlemler sürdürülmeli.

2.3. John Ridley Metodu

Başka bir sayısal risk değerlendirme yöntemlerinden olan ve John-Ridley' in kitabında yer alan bu yöntemde, risklerin büyüklüğü, ortaya çıkma ihtimali ve şiddetinden yola çıkarak riskler sayısal olarak değerlendirilmekte ve risk değeri aşağıdaki formüle göre hesaplanmaktadır [6].

$$R = S x (O + M) \quad (3)$$

R = Risk derecesi

S = Sıklık, baz alınan dönemde karşılaşılabilecek riskin tanımlanma sayısı

O = Ortaya çıkma olasılığı değeri

M = Maksimum potansiyel kayıp değeri

Tablo 5. John Ridley ortaya çıkma olasılığı değeri ve maksimum potansiyel kayıp değeri

ORTAYA ÇIKMA OLASILIĞI DEĞERİ		MAKSİMUM POTANSİYEL KAYIP DEĞERİ	
Her an	50	Çoklu ölüm	50
Saatte bir	35	Tekli ölüm	45
Günde bir	25	Sürekli sakatlık	40
Haftada bir	15	Göz kaybı	35
Ayda bir	10	Kol/Bacak kaybı	30
Yılda bir	5	El/Ayak kaybı	25
5 yıl ve daha fazla sürede bir	1	Sağırılık	20
		Kırık	15
		Derin kesik	10
		Hafif yaralanma	5
		Çizik, sıyrık	1

Bir risk analizi döneminde karşılaşılan risklerin frekans olarak alınıp, Tablo 5'te belirtilen Maksimum Potansiyel Kayıp Değeri ile Olasılık değerinin toplanarak çarpımı sonucunda risk değeri bulunmaktadır.

Bu yöntem için belirlenmiş olan veriler tablolar halinde hazırlanarak değerleri belirtilmiştir. Kullanıcı bu veriler doğrultusunda tablolar yardımı ile işyerine uygun sayısal verileri seçerek risk değerini bulmaktadır. John Ridley metodunun uygulanması sonucunda ortaya çıkan risk değerleri sonucunda kontrol önlemlerinin yerine getirilmesi süreleri Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. John Ridley risk kontrol eylem klavuzu

RİSK DERECESESİ	ÖNLEMİN ACİLİYETİ
$100 \leq R$	Derhal
$80 \leq R < 100$	Bugün
$60 \leq R < 80$	2 gün içerisinde
$40 \leq R < 60$	4 gün içerisinde
$20 \leq R < 40$	1 hafta içerisinde
$10 \leq R < 20$	1 ay içerisinde
$0 \leq R < 10$	3 ay içerisinde

3. Yapılan Çalışmalar

Bu bölümde risk değerlendirmesi yapılan işyerinin tanıtımı ve uygulanmış risk değerlendirme metoduyla alakalı bilgiler paylaşılmış olup elde edilen veriler gösterilmiştir.

3.1. Uygulamanın Yapıldığı İşyeri

Uygulama alanı olarak, Bağlar Belediyesine ait bazalt agrega tesisleri; Diyarbakır İli, Bağlar İlçesi, Karacadağ mevkiinde bulunmaktadır.

Karacadağ volkanı üzerinde bulunan sahadaki bazaltlar çok geniş bir alanı kaplamaktadır. Volkan Diyarbakır, Viranşehir ve Hilvan'a doğru uzanış göstermektedir. Lavlar ortalama 120 km çapında dairesel sayılabilecek geniş bir alana yayılmışlardır. Lav yığınları eğim olarak, Karacadağ'dan başlayıp çevresine doğru yaklaşık olarak 2° kadar azalmaktadır [7].



Şekil 1. Bazalt agrega tesisleri

Sosyal mesuliyet olarak önemli bir yere sahip olan Şekil 1'de gösterilen bu tesis, Karacadağ volkanının üzerinde yer aldığı sahada oldukça geniş bir alana yayılan bazaltın iş makineleri ile toplanarak agrega tesislerinde kırılır, alt yapı malzemesi ve dolgu malzemesi hammadde talebini karşılamaktadır.

3.2. Yapılan uygulamalar

Tesisdeki risklerin tespiti ile çalışma alanındaki faaliyetler birkaç başlık altında gösterilmiştir. Genel, İdari Bina, Ocak Alanı, Kırma Eleme Tesisleri, Stok Alanı ve Atölye Bakım Onarım Tesisleri başlığında değerlendirilme yapılmıştır.

Belirlenen riskler üç farklı risk değerlendirme metodu olan Fine-Kinney, HRNS ve John Ridley ile değerlendirilmiştir.

3.3. Bulgular

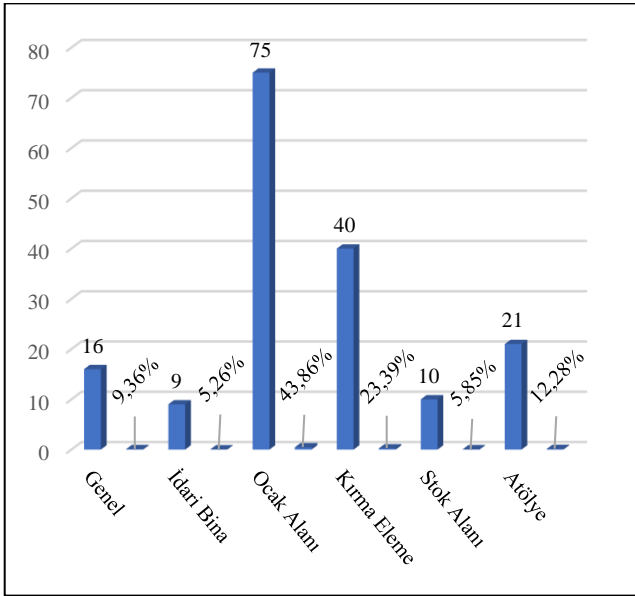
Tesis ile alakalı olarak belirlenen riskler 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği kanunu ve İş sağlığı ve Güvenliği Risk değerlendirme yönetmeliğine uygun olarak analiz edilmiştir.

Bazalt agrega üretim tesislerinde belirlenen riskler faaliyetlerine göre belirlenerek, çalışılan ekipmanlar, çalışılan alan ve faaliyetlerine göre sınıflandırılmıştır. Tehlike ve tehlike kaynağı olabilecek riskler tespit edilmiş ve bu riskler etmenlerine göre ayrılıp belirlenmiştir.

İşyeri faaliyet alanları genel, idari bina, ocak alanı, kırma eleme, stok alanı ve atölye olarak 6 başlık olarak analiz edilip değerlendirilmiştir.

Bu analizler sonucunda işyerinin belirtilen yapılarında tehlikeler ve riskler belirlenerek risk değerleri ve risk tanımları yapılmıştır.

Yapılan bu çalışmanın faaliyet alanlarına göre belirlenmiş risklerin oranı Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Tespiti yapılan risklerin bölümler içindeki oranı

Şekil 2’ de görüleceği üzere işyeri çalışılan ekipmanlar, çalışılan alan ve faaliyetlerine göre sınıflandırılmıştır. Tehlike ve tehlike kaynağı olabilecek riskler tespit edilmiş ve bu riskler etmenlerine göre ayrı ayrı belirlenmiştir. Bazalt agrega üretim faaliyet alanları;

- Genel
- İdari Bina
- Ocak alanı
- Kırma Eleme
- Stok Alanı
- Atölye

Olarak 6 başlık ana başlık altında değerlendirilmiştir. Faaliyetler esnasında olabilecek ya da oluşabilecek tehlikelerin belirlenmesi ve risk değerlendirmesinin sonucu olarak 171 madde risk tespiti yapılmıştır.

Risk değerlendirme tabloları ve çalışmanın tüm ayrıntıları [8] kaynağından incelenebilir.

Tespit edilen riskler risk değerlendirme yöntemlerine göre ve seviyelerine göre dağılımı ayrıntılı olarak belirtilip işyeri faaliyetlerine ve risk seviyelerine göre bölümlendirilmiş hali tablo 7’de gösterilmektedir.

Tablo 7. Fine Kinney, HRNS ve John Ridley ile yapılan risk değerlendirme verileri tablosu

FINE KINNEY METODU	HRNS METODU	JOHN RIDLEY METODU	Genel		İdari Bina		Ocak Alanı		Kırma Eleme		Stok Alanı		Atölye		Toplam	
			D.Ö.F. Öncesi	D.Ö.F. Sonrası	D.Ö.F. Öncesi	D.Ö.F. Sonrası	D.Ö.F. Öncesi	D.Ö.F. Sonrası	D.Ö.F. Öncesi	D.Ö.F. Sonrası	D.Ö.F. Öncesi	D.Ö.F. Sonrası	D.Ö.F. Öncesi	D.Ö.F. Sonrası	D.Ö.F. Öncesi	D.Ö.F. Sonrası
3 ay içerisinde	Kabul Edilemez Risk	3 ay içerisinde														
1 hafta içerisinde	Asırı Yüksek Risk	1 hafta içerisinde														
4 gün içerisinde	Yüksek Risk	2 gün içerisinde														
2 gün içerisinde	Orta Risk	Bu gün														
Derhal	Orta Risk	Derhal														
İmmal Edilebilir Risk	Kabul Edilemez Risk	Derhal	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Cok Düsük Risk	Asırı Yüksek Risk	Derhal														
Düsük Risk	Yüksek Risk	Derhal														
Önemli Risk	Cok Yüksek Risk	Derhal														
Yüksek Risk	Asırı Yüksek Risk	Derhal														
Cok Yüksek Risk	Kabul Edilemez Risk	Derhal														
İmmal Edilebilir Risk	Kabul Edilemez Risk	Derhal														
Cok Düsük Risk	Asırı Yüksek Risk	Derhal														
Düsük Risk	Yüksek Risk	Derhal														
Önemli Risk	Cok Yüksek Risk	Derhal														
Yüksek Risk	Asırı Yüksek Risk	Derhal														
Cok Yüksek Risk	Kabul Edilemez Risk	Derhal														
İmmal Edilebilir Risk	Kabul Edilemez Risk	Derhal														
Cok Düsük Risk	Asırı Yüksek Risk	Derhal														
Düsük Risk	Yüksek Risk	Derhal														
Önemli Risk	Cok Yüksek Risk	Derhal														
Yüksek Risk	Asırı Yüksek Risk	Derhal														
Cok Yüksek Risk	Kabul Edilemez Risk	Derhal														
İmmal Edilebilir Risk	Kabul Edilemez Risk	Derhal														
Cok Düsük Risk	Asırı Yüksek Risk	Derhal														
Düsük Risk	Yüksek Risk	Derhal														
Önemli Risk	Cok Yüksek Risk	Derhal														
Yüksek Risk	Asırı Yüksek Risk	Derhal														
Cok Yüksek Risk	Kabul Edilemez Risk	Derhal														
İmmal Edilebilir Risk	Kabul Edilemez Risk	Derhal														
Cok Düsük Risk	Asırı Yüksek Risk	Derhal														
Düsük Risk	Yüksek Risk	Derhal														
Önemli Risk	Cok Yüksek Risk	Derhal														
Yüksek Risk	Asırı Yüksek Risk	Derhal														
Cok Yüksek Risk	Kabul Edilemez Risk	Derhal														
İmmal Edilebilir Risk	Kabul Edilemez Risk	Derhal														
Cok Düsük Risk	Asırı Yüksek Risk	Derhal														
Düsük Risk	Yüksek Risk	Derhal														
Önemli Risk	Cok Yüksek Risk	Derhal														
Yüksek Risk	Asırı Yüksek Risk	Derhal														
Cok Yüksek Risk	Kabul Edilemez Risk	Derhal														
İmmal Edilebilir Risk	Kabul Edilemez Risk	Derhal														
Cok Düsük Risk	Asırı Yüksek Risk	Derhal														
Düsük Risk	Yüksek Risk	Derhal														
Önemli Risk	Cok Yüksek Risk	Derhal														
Yüksek Risk	Asırı Yüksek Risk	Derhal														
Cok Yüksek Risk	Kabul Edilemez Risk	Derhal														
İmmal Edilebilir Risk	Kabul Edilemez Risk	Derhal														
Cok Düsük Risk	Asırı Yüksek Risk	Derhal														
Düsük Risk	Yüksek Risk	Derhal														
Önemli Risk	Cok Yüksek Risk	Derhal														
Yüksek Risk	Asırı Yüksek Risk	Derhal														
Cok Yüksek Risk	Kabul Edilemez Risk	Derhal														
İmmal Edilebilir Risk	Kabul Edilemez Risk	Derhal														
Cok Düsük Risk	Asırı Yüksek Risk	Derhal														
Düsük Risk	Yüksek Risk	Derhal														
Önemli Risk	Cok Yüksek Risk	Derhal														
Yüksek Risk	Asırı Yüksek Risk	Derhal														
Cok Yüksek Risk	Kabul Edilemez Risk	Derhal														
İmmal Edilebilir Risk	Kabul Edilemez Risk	Derhal														
Cok Düsük Risk	Asırı Yüksek Risk	Derhal														
Düsük Risk	Yüksek Risk	Derhal														
Önemli Risk	Cok Yüksek Risk	Derhal														
Yüksek Risk	Asırı Yüksek Risk	Derhal														
Cok Yüksek Risk	Kabul Edilemez Risk	Derhal														
İmmal Edilebilir Risk	Kabul Edilemez Risk	Derhal														
Cok Düsük Risk	Asırı Yüksek Risk	Derhal														
Düsük Risk	Yüksek Risk	Derhal														
Önemli Risk	Cok Yüksek Risk	Derhal														
Yüksek Risk	Asırı Yüksek Risk	Derhal														
Cok Yüksek Risk	Kabul Edilemez Risk	Derhal														
İmmal Edilebilir Risk	Kabul Edilemez Risk	Derhal														
Cok Düsük Risk	Asırı Yüksek Risk	Derhal														
Düsük Risk	Yüksek Risk	Derhal														
Önemli Risk	Cok Yüksek Risk	Derhal														
Yüksek Risk	Asırı Yüksek Risk	Derhal														
Cok Yüksek Risk	Kabul Edilemez Risk	Derhal														
İmmal Edilebilir Risk	Kabul Edilemez Risk	Derhal														
Cok Düsük Risk	Asırı Yüksek Risk	Derhal														
Düsük Risk	Yüksek Risk	Derhal														
Önemli Risk	Cok Yüksek Risk	Derhal														
Yüksek Risk	Asırı Yüksek Risk	Derhal														
Cok Yüksek Risk	Kabul Edilemez Risk	Derhal														
İmmal Edilebilir Risk	Kabul Edilemez Risk	Derhal														
Cok Düsük Risk	Asırı Yüksek Risk	Derhal														
Düsük Risk	Yüksek Risk	Derhal														
Önemli Risk	Cok Yüksek Risk	Derhal														
Yüksek Risk	Asırı Yüksek Risk	Derhal														
Cok Yüksek Risk	Kabul Edilemez Risk	Derhal														
İmmal Edilebilir Risk	Kabul Edilemez Risk	Derhal														
Cok Düsük Risk	Asırı Yüksek Risk	Derhal														
Düsük Risk	Yüksek Risk	Derhal														
Önemli Risk	Cok Yüksek Risk	Derhal														
Yüksek Risk	Asırı Yüksek Risk	Derhal														
Cok Yüksek Risk	Kabul Edilemez Risk	Derhal														
İmmal Edilebilir Risk	Kabul Edilemez Risk	Derhal														
Cok Düsük Risk	Asırı Yüksek Risk	Derhal														
Düsük Risk	Yüksek Risk	Derhal														
Önemli Risk	Cok Yüksek Risk	Derhal														
Yüksek Risk	Asırı Yüksek Risk	Derhal														
Cok Yüksek Risk	Kabul Edilemez Risk	Derhal														
İmmal Edilebilir Risk	Kabul Edilemez Risk	Derhal														

Fine Kinney metoduna göre:

Mevcut alınan önlemler göz önünde bulundurularak düzeltici önleyici faaliyetler öncesinde 1 madde tolerans gösterilemez risk, 24 madde esaslı risk, 47 madde önemli risk, 99 madde olası risk kategorisinde belirlenmiştir.

Düzeltilici önleyici faaliyetler sonrasında yapılan değerlendirmede ise 2 madde önemli risk, 39 madde olası risk ve 130 madde önemsiz risk olarak belirlenmiştir.

HRNS metoduna göre:

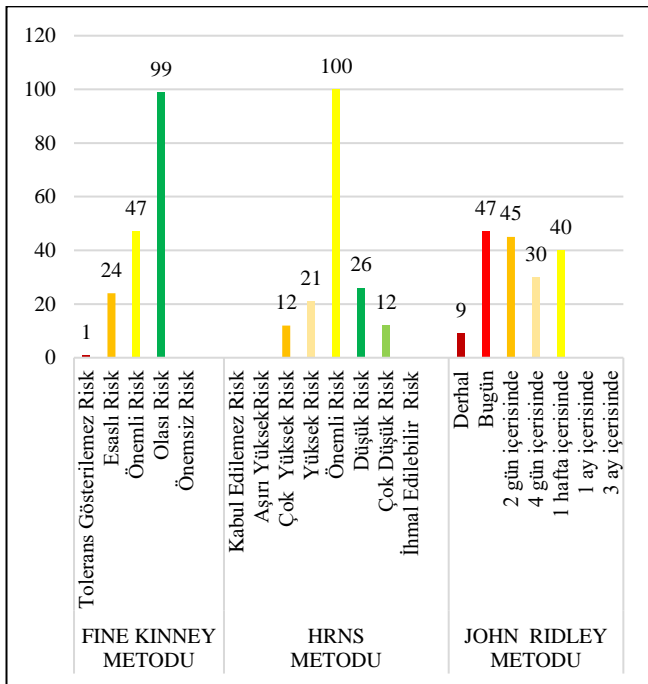
Mevcut alınan önlemler dikkate alınarak düzeltici önleyici faaliyetler öncesinde yapılan risk değerlendirmesinde; 12 madde çok yüksek risk, 21 madde yüksek risk, 100 madde önemli risk, 26 madde düşük ve 12 madde çok düşük risk olarak tespit edilmiştir.

Düzeltilici önleyici faaliyetler sonrasında ise 5 madde yüksek risk, 9 madde önemli risk, 30 madde düşük risk, 40 madde çok düşük risk ve 87 madde ihmal edilebilir risk olarak belirlenmiştir.

John Ridley metoduna göre:

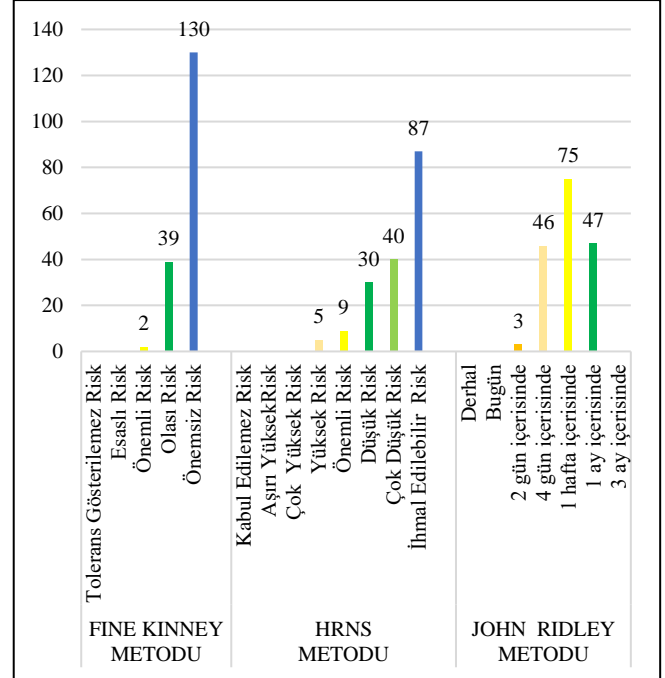
Mevcut alınan önlemler doğrultusunda düzeltici önleyici faaliyetler öncesinde 9 madde derhal, 47 madde bugün, 45 madde 2 gün içerisinde, 30 madde 4 gün içerisinde, 40 madde 1 hafta içerisinde olarak belirlenmiştir.

Düzeltilici önleyici faaliyetler sonrasında yapılan değerlendirmede ise 3 madde 2 gün içerisinde, 46 madde 4 gün içerisinde, 75 madde 1 hafta içerisinde, 47 madde 1 ay içerisinde olarak tespit edilmiştir.



Şekil 3. Fine-Kinney, HRNS ve John Ridley yöntemleri D.Ö.F. öncesinde tespit edilen risk sevipleri

Şekil 3'te görüleceği üzere mevcut alınan önlemler doğrultusunda düzeltici önleyici faaliyetler öncesinde yapılan risk değerlendirmeleri sonucunda tespit edilen 171 adet riskten risk seviyesi en yüksek olarak değerlendirilebilecek yöntemin John Ridley yöntemi olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4. Fine-Kinney, HRNS ve John Ridley yöntemleri ile D.Ö.F. sonrasında tespit edilen risk sevipleri

Şekil 4'te görüleceği üzere düzeltici önleyici faaliyetler sonrasında yapılan risk değerlendirmelerinin sonucunda her üç yöntemde de düşüş eğilimi görülmüştür. John Ridley yönteminin Fine Kinney ve HRNS risk analizi yöntemlerine göre daha az düşüş sergilediği görülmektedir.

4. Sonuçlar ve Değerlendirmeler

Bu çalışmada Fine-Kinney, HRNS ve John Ridley metotları kullanılarak bazalt agrega üretim tesislerinde iş sağlığı ve güvenliği risk değerlendirilmeleri karşılaştırma çalışması uygulanmıştır

Yapılan bu çalışma işyeri risk değerlendirme çalışmalarının sonucu olarak bazalt agrega sektörü ve maden işyerleri için iş kazası ve meslek hastalıklarının önlenmesi amacıyla risk değerlendirme metotları arasından işyerine en uygun olan metodun seçiminde kullanılması amacı ile hazırlanmıştır.

Çalışmanın sonucunda aşağıdaki sonuç ve önerilere ulaşılmıştır.

Mevcut önlemler dikkate alınarak yapılan risk değerlendirmesinde HRNS metodu Fine-Kinney metoduna göre daha fazla yüksek risk tespit etmiştir. John Ridley metodu ile yapılan risk değerlendirmesinde ise yüksek sayılabilecek risk adedi diğer iki yöntemle göre fazla olduğu görülmektedir.

HRNS metodunda risk derecesi hesaplamasında çalışan sayısı çarpan olarak kullanıldığından dolayı yüksek çıkan risk değeri risk değerlendirme sonucunu etkilemektedir. Bu sebeple HRNS metodu Fine-Kinney metoduna göre yüksek seviyede sayılacak riskleri tespit ettiği görülmüştür.

Düzeltilici önleyici faaliyetler sonrasında yapılan risk değerlendirmesinde Fine-Kinney metodu ile HRNS metodu birbirine yakın sayılabilecek düzeyde risk tespit etmiştir. John Ridley metodu ise bu iki metoda göre yüksek sayılabilecek risk tespit etmiş olduğu görülmektedir.

Fine-Kinney metodu ile yapılan risk değerlendirmesinde ölüm ile sonuçlanabilecek iş kazalarında risk derecesi hesaplamasında olasılık ve frekans değerlerinin düşük olması halinde risk değerlendirme sonucu düşük olarak çıkabilmektedir.

HRNS metodu ile yapılan risk değerlendirmesinde ölüm ile sonuçlanabilecek iş kazalarında risk derecesi hesaplamasında çalışan sayısı çarpan olarak kullanıldığından dolayı çalışan sayısı az olduğunda risk değeri düşük çıkmaktadır dolayısıyla risk seviyesi de düşük olmaktadır.

Bu çalışmada karşılaştırılan yöntemler arasında yüksek sayılabilecek en çok risk tespiti John Ridley metodu ile tespit edilmiştir. Bunun nedeni John Ridley metodunda riskin olası sonuçları arasında ölüm ile sonuçlanabilecek iş kazalarında maksimum potansiyel kayıp değeri tablosuna göre şiddet değerinin yüksek olmasıdır.

Günümüzde değişen ve gelişen teknolojiyle, işyeri ortamlarında mevcut tehlikeler ve riskler değişebilmektedir. Bu açıdan bakıldığında iş sağlığı ve güvenliği yönetimi dinamik bir süreçtir. İş kazası ya da meslek hastalığı ortaya çıkmadan, işyerinde meydana gelebilecek tehlikelerin ve risklerin belirlenmesi ile bunlara karşı tedbirlerin alınmasını içeren risk değerlendirme süreciyle iş kazası veya meslek hastalıklarının önlenmesi açısından oldukça önemlidir.

Alınacak düzeltilici ve önleyici tedbirler sonrasında risk seviyelerinin düşmesi iş sağlığı ve güvenliği çalışmalarının uygulanmasında, çalışanlara eğitim verilmesi, kişisel koruyucu donanım verilmesi veya işyerine asılan uyarı levhası, tabela ve ikaz işaretlerinin her zaman yeterli olmadığı görülebilmektedir.

Fine-Kinney ve HRNS yönteminde risk değerlerine göre yapılan risk değerlendirme sonucunda riskin ortadan kaldırılması ya da alınması gereken önlemlerin süre ve zamanını tam olarak belirtilmemektedir.

HRNS yöntemi Fine-Kinney yöntemine göre risk seviyelerinde yapılması gereken açıklama kısımları daha detaylı olarak gösterilmektedir. John Ridley yönteminde ise diğer iki yönteme göre risk derecelerinde belirtilen önlemlerin alınması hususunda süre belirtilmemektedir.

Maden işyerlerinin durumu dikkate alındığında tespit edilen riskler için bir an önce önlem alınması gerektiği düşünülmüş John Ridley metodunun bu tip faaliyet alanı içerisinde olan işyerleri ve maden işyerleri için risk değerlendirme yöntemi olarak kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

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

Fidan, veri toplama, verilerin analizi ve yorumlanması. Akkoyun, çalışma konsepti ve tasarım, taslağın oluşturulması, revizyon.

Teşekkür

Çalışmanın yapıldığı tesis yetkililerine, sorumlularına, çalışanlarına ilgilerinden ve yardımlarından dolayı teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] Türkiye Büyük Millet Meclisi (TBMM). (2012). İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu Gerekçesi. <http://www.tbmm.gov.tr/d24/1/1-0605.pdf>. [Erişim Tarihi 01.03.2022].
- [2] Anonim (b), 2021. 29/12/2012 tarih ve 28512 sayılı Resmi Gazetede yayımlanan İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirmesi Yönetmeliği. <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=16925&Mevzuat-Tur=7&MevzuatTertip=5> [Erişim Tarihi 01.03.2022].
- [3] Fine, W.T. 1971. Mathematical evaluations for controlling hazards. Journal of Safety Research. 3, 157-166.
- [4] Kinney, G.F.,Wiruth, A.D. 1976.Practical Risk Analysis ForSafety Management. NWC Technical Publication 5865, Naval Weapons Center, China Lake CA, USA.
- [5] Bilir S. ve Güranlı G.E., (2015), "Applicability of The Hazard Rating Number System in The Construction Industry", The XXVIIth Annual Occupational Ergonomics and Safety Conference 28-29 Mayıs 2015, Nashville, Tennessee, USA.
- [6] Ridley J. 1983. Safety at Work Seventh Edition. Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, UK 30 Corporate Drive, Suite 400, Burlington, MA 01803, USA
- [7] Canpolat, E. 2005. Karacadağ (Diyarbakır) volkanı jeomorfolojisi. İstanbul Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
- [8] Fidan, M.Y.,2023. "Farklı İsg-Risk Değerlendirme Yöntemlerinin Bazalt Agregat Üretim Tesisinde Uygulamalı Karşılaştırılması", Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi



Endüstriyel Depo Raf Sistemlerinin Yapısal Güvenliğinin Dinamik Etkiler Altında İncelenmesi

Structural Safety Investigation of Industrial Steel Storage Rack Systems Under Dynamic Effects

Alper Deniz¹, Ülgen Mert Tuğsal^{2*}

¹ Gebze Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, alperdeniz@gtu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1606-7846>

² Gebze Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, umtugsal@gtu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7304-4432>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 24 Nisan 2023
Revizyon 2 Ocak 2024
Kabul 8 Şubat 2024
Online 29 Mart 2024

Anahtar Kelimeler:

Endüstriyel Depo Raf Sistemleri,
Doğrusal Olmayan Statik ve
Dinamik Analiz, Kuvvetli
Yer Hareketi, Deprem Davranışı

ÖZ

Son yıllarda ülkemizdeki büyük halka açık depo mağazaları ve büyük firmaların depolama yapılarının sayısı artmıştır. Bu alanlarda kullanılan depo raf sistemleri endüstriyel ürünlerin 'üretim-dağıtım-satış-tüketim' döngüsü içinde güvenli bir şekilde depolanması/saklanması adına önem taşımaktadır. Çalışma kapsamında iki farklı yüksekliğe ve kiriş-kolon bağlantı detayına sahip depo raf sistemlerinin deprem etkisi altındaki davranışları incelenmiştir. Kiriş-kolon birleşim detayları bu yapıların sismik davranışında önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle özellikle koridor doğrultusundaki kiriş-kolon birleşimlerinin deprem davranışına katkısının değerlendirilmesi amacıyla oluşturulan yapısal modellerde iki farklı tip birleşim göz önüne alınmıştır. Oluşturulan 3-ve 5- katlı modeller için doğrusal olmayan statik ve dinamik yöntemler çerçevesinde SAP 2000 programı ile yapısal analizler gerçekleştirilmiş ve deprem etkisi altındaki davranışları irdelenmiştir. Gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizlerde kolon-kiriş birleşimlerinin tersinir çevrimsel moment-dönme ilişkileri için literatürde yer alan deneysel çalışmalardan faydalanılmıştır. Yapı yüksekliği ve birleşim noktası detayı unsurlarının sistemin deprem davranışını önemli ölçüde etkilediğinin belirlendiği bu çalışmada yapısal hasarın sınır durumlarını belirlemek için mühendislik talep parametreleri seçilmiştir. Doğrusal olmayan statik itme analizi sonuçlarına bağlı olarak elde edilen yapısal kapasiteler doğrusal olmayan artımsal dinamik analiz sonuçları ile değerlendirilerek ilgili talep parametreleri için olası hasar sınırları belirlenmeye çalışılmış ve bu çerçevede kırılma eğrileri oluşturulmuştur. Çalışmada elde edilen bulguların endüstriyel döngüde ürünlerin güvenli bir şekilde depolanması noktasında fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 24 April 2023
Received in revised form 2 January 2024
Accepted 8 February 2024
Available online 29 March 2024

Keywords:

Industrial Storage Rack Systems,
Nonlinear Static and Dynamic
Analyses, Strong Ground Motion,
Earthquake Behavior

Doi: 10.24012/dumf.1286960

* Sorumlu Yazar

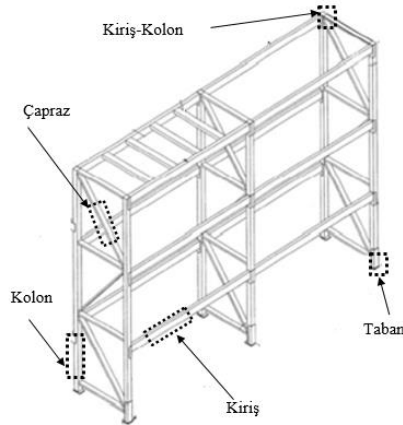
ABSTRACT

Recently, the number of large public warehouse stores and storage structures of large companies in our country has increased. The rack systems used in these areas are important for the safe storage of industrial products. Within the scope of this study, earthquake behavior of storage rack systems with different heights and different cases of beam-to-column connections are examined while joint details play an important role in the seismic behavior of these systems. Therefore, two different connection types have been considered in the structural models to evaluate the contribution of beam-to-column connections in the earthquake behavior of the models for the down-aisle direction. For the 3- and 5- storey models, static and dynamic structural analyses are carried out utilizing SAP2000 program and the earthquake behaviors are determined within the framework of nonlinear analysis methods. During nonlinear analyses, the experimental studies in the literature are taken into consideration for the cyclic moment-rotation relationships of beam-to-column connections. In this study, in which it is determined that the building height and beam-to-column connection detail significantly affect the seismic behavior of the system, engineering demand parameters are chosen to determine the limit states of structural damage. These limits are investigated by evaluating the structural capacities according to non-linear static push-over analysis and drift values that are obtained from incremental dynamic analysis. The fragility analysis is conducted depending on these limit failure conditions. It is believed that the findings obtained in this study will be beneficial at the point of safe storage of products in the industrial cycle.

Giriş

Günümüzde çelik depo raf sistemleri, insanlığın gelişen ihtiyaçlarına bağlı olarak farklı endüstri kollarının vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Bu sistemler, lojistik tedarik zincirinin en önemli unsuru olan ürünlerin 'üretim-dağıtım-satış-tüketiciye ulaşım' döngüsü içinde güvenli bir şekilde depolanması/saklanması amacıyla kullanılmaktadır. Bu bağlamda ülkemizde de taşımacılık, depolama, paketleme, gümrükleme ve nihai tüketiciye erişimi de kapsayan lojistik hizmetleri gelişimini sürdürmekte ve bu sistemlerin kullanımı hızla yaygınlaşmaktadır.

Farklı sektörlerde pek çok üretici ürünlerini (otomotiv, elektronik, beyaz eşya, gıda, tekstil, kimyasal madde, yapı malzemesi, vb.) farklı yükseklikteki endüstriyel depo raf sistemlerinde depolanmaktadır. Bu sistemler depolar için pratik ve ekonomik bir çözüm sunmaktadır. Bunlara ilave olarak hızlıca kurulum özelliğine sahiptir. Zamandan ve alandan tasarruf etmemizi sağlar. Modern hayatın getirdiği yeniliklere paralel olarak artık günümüzde büyük alışveriş merkezlerinde, marketlerde, konsept mağazalarında halkın kullanımına da açık hale gelmiştir. Yaygın olarak kullanımına bağlı olası bir tehlike durumunda hayati ve finansal kayıp riskini en aza indirmek bir gereklilik olarak karşımıza çıkmaktadır. Çelik depo raf sistemleri endüstride depolama için yaygın olarak kullanılmakta ve genellikle paletlere yerleştirilen yükleri taşımaktadır. Tipik bir palet rafının yapısal elemanları, gövde ve başlıklar boyunca delinmiş olan soğukta şekillendirilmiş çelik dikmeler ile genellikle dikdörtgen kutu kesite sahip kirişlerden oluşmaktadır. Kirişler, kirişlerin uçlarına önceden kaynaklanmış uç bağlantılarla dikmelere bağlanmaktadır. Şekil 1'de tipik bir depo raf sistemini görülmektedir.

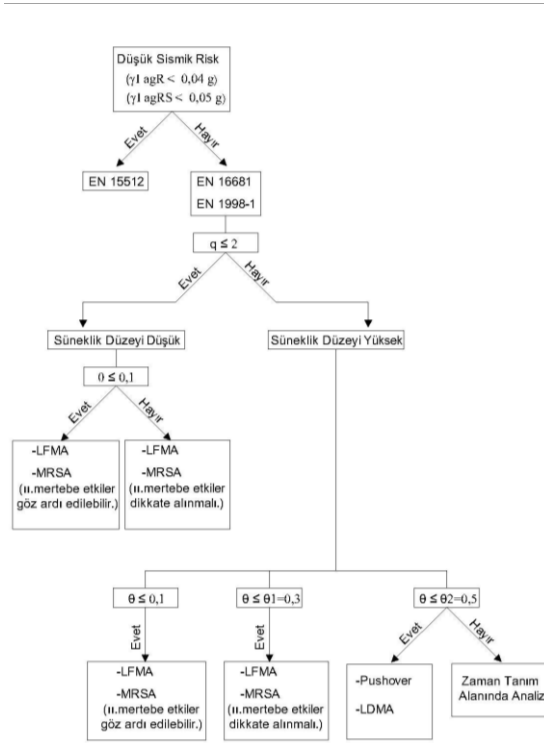


Şekil 1. Çelik Depo Raf Sistemi

Düsey taşıyıcı elemanlar (kolonlar) enkesit özellikleri ve kesitteki delikler nedeniyle farklı burkulma türlerine karşı narin bir davranış sergilemektedir. Tüm kolonda global burkulma veya kolon enkesiti flanşlarında lokal ya da çarpılma burkulması gibi etkilerin önlenmesi amacıyla bu elemanlar kompleks formda kesitlere sahip olacak şekilde üretilmektedir [1]. Çelik depo raf sistemlerinde kiriş-kolon bağlantıları farklı bağlantı tiplerinin moment taşıma kapasitelerine göre gruplandırılmakta ve rijit, yarı rijit ve

moment aktarmayan bağlantılar olarak sınıflandırılabilir. Yarı rijit bağlantıların moment taşıma kapasitelerinin deneysel ve teorik olarak belirlendiği bir çalışmada, kiriş-kolon birleşiminin kancalı olması durumu üzerinde incelemeler yapılmıştır [2]. Yapılan deneysel testlerde davranışın yarı-rijit olduğunu belirlemiştir. Başka bir çalışmada ise kiriş-kolon birleşimlerini yarı rijit olarak kabul etmiş ve 3 boyutlu sonlu elemanlar programı olan ANSYS ile birleşimlerin moment-dönme ilişkilerini elde etmişlerdir. Cıvatalı kolon-kiriş birleşiminin döngüsel performansını bir test düzeneği üzerinde incelendiği bir başka çalışmada, histeretik davranışta pinching4 modelinden yararlanılmıştır [3]. Tipik cıvatalı ve cıvasız bağlantılar arasında bir karşılaştırma da yapılmıştır. İki cıvatalı bağlantının enerji dağıtma kapasitesinin, tek cıvatalı bağlantılara kıyasla önemli ölçüde arttığı belirtilmiştir [4]. Diğer bir önemli bağlantı elemanı ise taban plakalarıdır. Bu bağlantılar kolon elemanın üzerinde oluşan yükü zemine aktarması için tasarlanan bağlantılardır. Mesnet tiplerinin basit ve ankastre olması durumu konusu üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Ankastre mesnet olması durumunda sistemin periyodu azalmıştır [5]. Çapraz doğrultudaki yüklemelerde ankrajların performansının incelendiği bir çalışmada farklı tipteki ankrajlar sonlu elemanlar programı vasıtasıyla çözümlenmiştir [6].

Çelik depo raf sistemlerinde kullanılan düsey elemanların enkesit özelliklerinin kompleks formda olması yapısal davranışlarının teorik olarak tahmin edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle mevcut tasarım standartları, sistemi oluşturan elemanların ve bağlantılarının deneysel test sonuçlarına bağlı olarak oluşturulmuştur. Çalışmada öncelikle depo raf sistemleri özelinde kullanılmakta olan mevcut yönetmelikler incelenmiştir. Son yıllarda yapılan güncel çalışmalarda yapısal tasarım aşamasında 'BS EN 15512:2009, Steel Static Storage Systems — Adjustable Pallet Racking Systems — Principles for Structural Design., British Standards Institution.' yönetmeliğinin kullanıldığı görülmüştür. Deprem yükleri etkisinde yapısal analiz içinse 'BS EN 16681:2016, BSI Standards Publication Steel Static Storage Systems — Adjustable Pallet Racking Systems — Principles for Seismic Design., British Standards Institution.' normu kullanılmaktadır. EN 16681 normunda depo raf sistemlerinin tasarımında yapılacak olan kabuller ve yapısal analizlerde kullanılacak olan hesap yönteminin seçimi ile ilgili belli kısıtlamalar ve yönlendirmeler mevcuttur. Yapısal analizlerde kullanılacak yöntemin seçiminde izlenecek olan aşamalar Şekil 2'de özetlenmiştir. Tasarım yöntemini belirlemede kullanılan temel parametreler süneklik düzeyi (q) ve katlar arası ötelenme oranı (θ) dir. Yüksek sismik risk olması durumunda EN 16681 normu çerçevesinde öncelikle sistemin süneklik düzeyine karar verilir ve sonrasında ötelenme oranları belirlenerek hesap yöntemi seçilmektedir. Çalışma kapsamında oluşturulan yapısal modeller için Şekil 2'deki yönerge takip edilerek elde edilen görel kat ötelenmesi oranlarına bağlı olarak yapısal analiz yöntemine karar verilmiştir. Yer çekimi ivmesi (g), eşdeğer deprem yükü yöntemi (LFMA) ve mod birleştirme yöntemi (MRSA) olarak tanımlanabilmektedir.



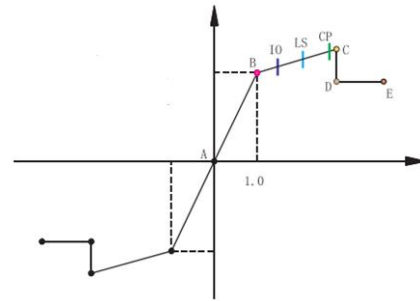
Şekil 2. Tasarım yöntemi belirleme adımlarına ait akış şeması.

İlgili normda endüstriyel depo raf sistemlerinin yapısal performans seviyelerine ait herhangi bir tanımlama yer almamaktadır. İfade edilen sadece göz önüne alınması gereken performans gereksinimini sağlayacak şekilde bir tasarım yapılmasıdır. Raf yapısı, depremden sonra yapısal bütünlüğünü ve yük taşıma kapasitesini koruyarak, yerel veya tümünden göçme olmaksızın tasarım kuvvetlerine dayanacak şekilde tasarlanması önerilmektedir. Bu nedenle, tez çalışması kapsamında ilgili sistemlerin performans seviyelerini belirlemek üzere bir çalışma yapılması amaçlanmıştır. Oluşturulan yapısal modeller göz önüne alınarak gerçekleştirilen doğrusal olmayan statik ve dinamik analiz sonuçları belirlenen mühendislik şiddet parametrelerine bağlı olarak irdelenmiş ve yapısal hasarın limit durumlarını tahmin etmek üzere değerlendirmeler yapılmıştır.

Literatürde çelik depo raf sistemlerinin deprem etkisi altındaki davranışlarının değerlendirilmesi hususunda çok fazla sayıda çalışma bulunmamaktadır. Çelik depo raf sistemleri özelindeki uluslararası normlarda bu sistemlerin yapısal kapasitelerine ait hasar sınır durumlarının belirli olmaması nedeniyle, literatürde konuyla ilgili incelenen çalışmalarda görüldüğü üzere araştırmacılar tarafından farklı yaklaşımlarda bulunduğu değerlendirilmiştir. Bu çalışmada depo raf sisteminin bulunduğu yere bağlı olarak elde edilen maksimum yer hareketi ivmesine göre koridor doğrultusundaki yerdeğiştirme talebini ve kapasitesini değerlendirmek için yerdeğiştirmeye dayalı bir yöntem geliştirilmiştir. Önerilen yöntemin Amerika Birleşik Devletleri'ndeki bina yönetmeliklerinde yer alan performans hedefleriyle uyumlu olduğu belirtilmiştir ve uygunluğunu göstermek amacıyla analitik çözümler

gerçekleştirilmiştir. Çalışma özelindeki analitik yöntemle incelenen yapısal model gerçek boyutları ile test merkezinde simüle edilmiş ve böylelikle oluşturulan yapısal model ve deney sonuçları doğrulanmıştır. Önerilen yerdeğiştirmeye dayalı yöntemin uygulanabilirliği, kiriş-kolon bağlantılarının moment-dönme eğrilerinin mevcudiyetine bağlı olmakla beraber yapısal performans düzeyi göçmenin önlenmesi olarak hedeflenmiştir [5].

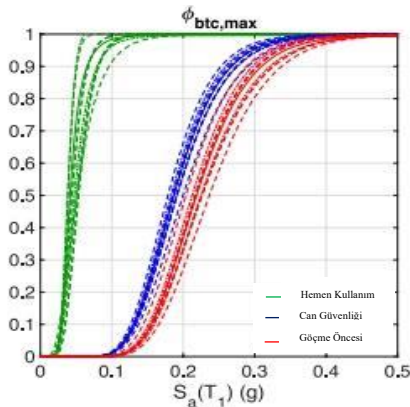
Literatürde yer alan çalışmada oluşturulan yapısal modellerde gerçekleştirdikleri doğrusal olmayan çözümlerinde yapısal elemanlar için plastik mafsalları tanımlamalarını ve hasar limit durumlarını FEMA-356'ya göre değerlendirmiştir (Şekil 3). A noktası ile B akma noktası arasında lineer davranır. B noktası ile C noktası pekleşme olmaktadır. C noktasından D noktasına önemli derecede dayanım azalması olmaktadır. E noktasında büyük deformasyonlara ulaşır ama dayanım sıfırdır. IO (hemen kullanım düzeyi), LS (can güvenliği düzeyi), CP (göçme önleme düzeyi) hasar sınırlarını ifade etmektedir. Farklı kiriş-kolon bağlantı tiplerinin göz önüne alınarak yapısal modellerin oluşturulduğu çalışmada sonlu elemanlar programı olan Sap 2000 vasıtasıyla doğrusal olmayan statik itme analiz yöntemi çerçevesinde yapısal modellere ait taban kesme kuvveti-tepe yerdeğiştirme grafikleri elde edilip, az-hasar, orta-hasar ve ağır-hasar olmak üzere 3 farklı performans düzeyi noktası belirlenmiştir [7]. Bu hedef yerdeğiştirmelere göre yapısal modellerin performans değerlendirmeleri yapılarak göçme mekanizması incelenmiştir.



Şekil 3. Çelik elemanlar için geliştirilmiş kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi.

Önceki çalışmanın devamı niteliğinde gerçekleştirdikleri bir diğer çalışmada oluşturdukları bu yapısal modellerin deprem etkisi altındaki davranışlarını Artımsal Dinamik Analiz (IDA) yöntemi ile değerlendirmiştir [8]. Hesaplamalar iki tip kiriş-kolon bağlantı detayı göz önüne alınarak yapılmış olup, yapısal modellemeler aynı kalmak koşuluyla birleşimlerin histeretik davranışı deneysel testlerden elde edilen veriler ile çoklu lineer bağlantı olarak tanımlanmıştır. Doğrusal olmayan zaman tanım alanındaki analizlerde 22 takım kuvvetli yer hareketi kaydı kullanılarak, toplamda 44 deprem yer hareketi etkisi altında dinamik analizleri gerçekleştirilerek IDA eğrileri (spektral ivme-maksimum göreceli kat ötelenmeleri) elde edilmiştir. Sistemin göçme noktasını tahmin etmek için birleşik bir IM (deprem düzeyi) / DM (hasar düzeyi) tabanlı kural kullanılmış olup, IM için S_a , DM için ise

maksimum görelî kat ötelenmesi oranı dikkate alınmıştır. $DM \geq 0.02$ olduğunda rafın göçmüş olduğu ve bu noktadaki teğet eğimin elastik eğimin %20'sinden düşük olduğu kabul edilerek bu doğrultuda kırılabilirlik eğrileri oluşturulmuştur [8]. Son yıllarda yapılan bir çalışmada oluşturmuş olan yapısal modellerde 3 farklı kiriş eleman enkesiti göz önüne alınmıştır (WB.100.40, WB.120.40, WB.140.40). Kiriş-kolon bağlantı tipleri için 3 farklı birleşim detayının irdelendiği bu çalışmada bağlantıların kancalı, 2 civatalı ve 4 civatalı olması durumuna göre toplamda 9 farklı tipe göre 'Specification for the Design, Testing and Utilization of Industrial Steel Storage Racks (RMI 2012)' normu çerçevesinde deneysel testler gerçekleştirilmiş olup, bağlantı tiplerinin moment-dönme ilişkileri elde edilmiştir. Bu deney sonuçlarına göre göz önüne alınan her bir farklı bağlantı tipi için hemen kullanım (IO), can güvenliği (LS) ve göçme öncesi (CP) performans seviyeleri belirlenmiştir (Şekil 3). Deneysel testlerden edilen verilere göre kiriş-kolon bağlantıları çoklu lineer bağlantı elemanı olarak tanımlanmış olup ilgili modellerin bazılarında deneylerde oluşan plastik deformasyon durumlarına göre plastik mafsal tanımı yapılmıştır [9]. Depo raf sistemlerinin yapısal performansları malzeme özellikleri, kiriş-kolon bağlantı detayı, palet yüklerinin düzeni, malzeme imalat hataları gibi unsurlardan etkilendiği için bu sistemlerdeki belirsizlikler dinamik davranışlarını da önemli ölçüde değiştirmektedir. Malzeme özelliklerinin ve bağlantı detaylarının mühendislik talep parametreleri üzerindeki etkisinin incelendiği çalışmada yapısal sistemlerde meydana gelen hasarı tahmin etmek için üç farklı parametre seçilmiştir: i) maksimum kat ötelenmesi, ii) kiriş-kolon bağlantılarındaki maksimum dönme ve iii) taban plakasındaki maksimum dönme. Performans seviyeleri için üç sınır durum dikkate alınmıştır: Hemen Kullanım (IO), Can Güvenliği (LS) ve Göçme Öncesi (CP). Uluslararası standartlarda depo raf sistemlerine ait herhangi bir performans seviyesi belirtilmediği gerekçesiyle göz önüne alınan her bir sınır durum için mühendislik parametrelerinin kapasite değerleri, doğrusal olmayan statik itme analizleri, değişen akma momenti kapasiteleri, kiriş-kolon ve taban-plaka bağlantı kapasiteleri değerlendirilerek elde edilmiştir. Belirlenen üç hasar limit durumuna göre oluşturulan kırılabilirlik eğrileri Şekil 4' de verilmiştir [10].

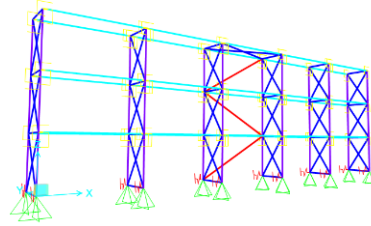


Şekil 4. Farklı hasar durumlarına göre kırılabilirlik eğrileri

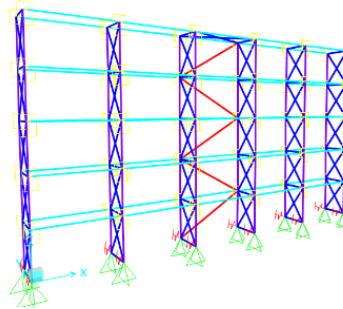
Depo raf sistemlerinin deprem davranışlarını 3 farklı limit hasar seviyesine göre değerlendirildiği çalışmada, bu hasar seviyeleri maksimum katlar arası ötelenme ve maksimum kolon-kiriş bağlantı dönmelerine göre belirlenmiştir. Raf sistemlerine ait limit sınır değerleri olmamasından dolayı her bir limit değeri doğrusal olmayan statik itme analizi ile elde edilmiştir. Şekil 3' de tanımlanan hemen kullanım (IO), can güvenliği (LS) ve göçme öncesi (CP) hasar sınırlarını sırasıyla %1, %2 ve %4 görelî kat ötelenmesi oranı olarak belirlenmiş olup artımsal dinamik analizi ile elde edilen IDA grafikleri doğrultusunda 3 farklı hasar seviyesine göre kırılabilirlik eğrilerini oluşturmuştur [11].

Materyal ve Metot

Burada sunulan çalışmada Gebze Organize Sanayi Bölgesi'nde konumlandığı düşünülen 3- ve 5-katlı endüstriyel depo raf sistemlerinin yapısal modelleri sonlu elemanlar programı aracılığıyla modellenmiştir (Şekil 5 ve 6). Yapısal modellerde kat yüksekliği 1500 mm aks açıklıkları ise 2700 mm olacak şekilde belirlenmiştir. Yanal stabilitenin sağlanması amacıyla EN 15512 ve EN 16681 normları çerçevesinde yapısal modeller orta aksta düşey ve yatay doğrultuda tek çerçevede çapraz elemanlar kullanılarak tasarlanmıştır.

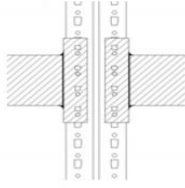


Şekil 5. 3 katlı yapısal model

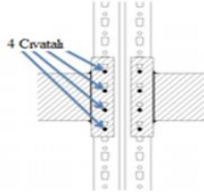


Şekil 6. 5 katlı yapısal model

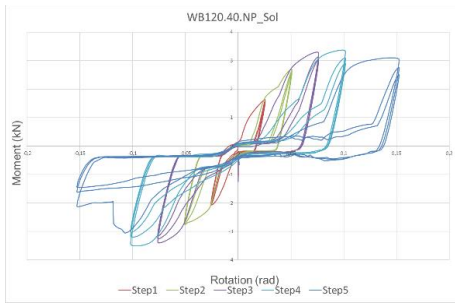
Oluşturulan yapısal modellerde kolon-kiriş bağlantı noktalarının moment-eğrilik ilişkileri literatürde yer alan detaylı deneysel çalışmanın bulgularından alınmıştır [9]. Şekil 9 ile 12 arasında moment eğrilik ilişkileri gösterilmiştir. Bu çalışma kapsamında yapısal modeller oluşturulurken, kolon-kiriş bağlantı detayının yapısal davranışa etkisinin incelenmesi amacıyla 2 tip bağlantı detayı göz önüne alınmış ve ilgili bağlantılar 4 civatalı (WB. 120.40.4P) ve kancalı (WB.120.40.NP) bağlantılar olarak belirlenmiştir (Şekil 7 ve 8).



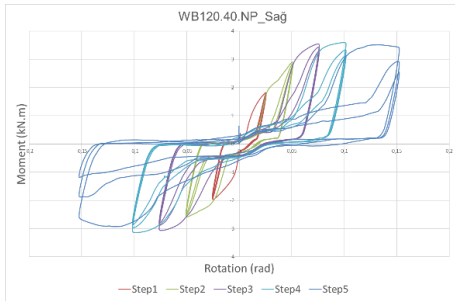
Şekil 7. Kancalı WB.120.40.NP bağlantı tipi



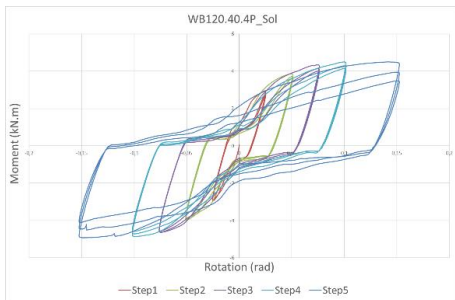
Şekil 8. 4-Civatalı WB.120.40.4P bağlantı tipi



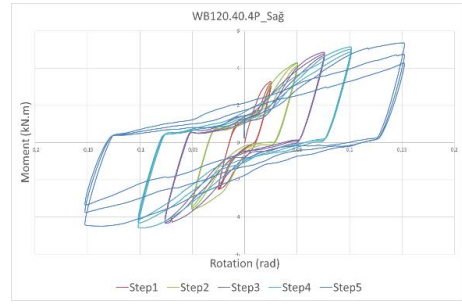
Şekil 9. WB120.40.NP_Sol moment eğrilik ilişkileri



Şekil 10. WB120.40.NP_Sağ moment eğrilik ilişkileri



Şekil 11. WB120.40.4P_Sol moment eğrilik ilişkileri



Şekil 12. WB120.40.4P_Sağ moment eğrilik ilişkileri

Oluşturulan yapısal modeller için koridor doğrultusundaki davranış göz önüne alınmıştır. Depo raf sistemlerinin kiriş-kolon bağlantı rijitlikleri deprem performansını belirlemektedir. Literatürde yer alan çalışmada koridor doğrultusunda depo raf sistemlerinin göçme durumu incelenmektedir [5]. Yapısal modelde doğrusal olmayan davranışın kiriş-kolon birleşim bölgelerinde olduğu kabul edilmekte ve bu kabule göre kiriş ve kolon elemanlarının davranışları elastik sınırlar içerisinde kalmaktadır. Kolon-kiriş birleşimleri SAP2000 programında multilinear plastik link eleman olarak tanımlanmıştır [8].

Doğrusal olmayan statik itme analizi

Türkiye Deprem Tehlike Haritası göz önüne alınarak Gebze Organize Sanayi Bölgesi'nde yer aldığı düşünülen yapısal sistemlerin doğrusal olmayan statik itme analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar programı olan SAP2000 ile kurulan yapısal modellerin hâkim doğal titreşim mod şekli genliği ile orantılı yatay yük dağılımları belirlenmiştir. Taban kesme kuvveti – tepe yer değiştirmesi ilişkisi olarak itme eğrileri elde edilmiş ve daha sonra bu eğrilerin koordinatları dönüştürülmesiyle modal tek serbestlik dereceli sisteme ait modal ivme – modal yer değiştirme ilişkisi olarak modal kapasite diyagramları elde edilmiştir. Talep yer değiştirmeleri göz önüne alınarak doğrusal olmayan statik itme analizleri yenilenmiş ve göz önüne alınan her bir yapısal model için koridor yönündeki itme eğrisi elde edilmiştir [23].

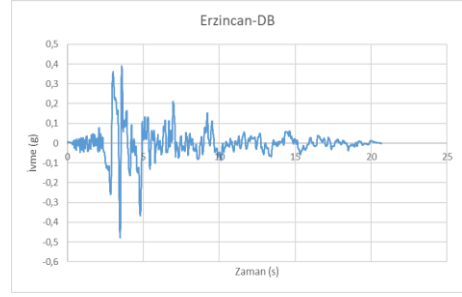
Doğrusal olmayan artımsal dinamik analiz

Şekil 5 ve 6'da görülen iki farklı yüksekliğe sahip yapısal modellerin analitik yöntemler kullanılarak kırılma eğrilerini elde etmek üzere artımsal dinamik analiz yöntemi uygulanmıştır [24]. Doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizlerinde kullanılmak üzere kuvvetli yer hareketi kayıtları PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center) <https://ngawest2.berkeley.edu> internet sitesinden alınmış olup 11 deprem kaydı takımı seçilmiştir. Seçilen deprem kayıtlarına ait özellikler Tablo 1'de ve ivme zaman serileri doğrultuları da verilerek (KG: Kuzey-Güney, DB: Doğu-Batı) Şekil 13 ile 34 arasında sunulmaktadır. Maksimum hız (Vmax) Maksimum ivme (Amax) olarak gösterilmiştir. Seçilen kuvvetli yer hareketleri maksimum yer ivmesi (Peak Ground Acceleration -PGA) değerleri, $g: 9.81 \text{ m/s}^2$ olmak üzere 0.1 g 'den 2.0 g 'ye kadar 0.1 g artımları ile ölçeklendirilmiş ve böylelikle çalışma kapsamında göz önüne alınan her bir

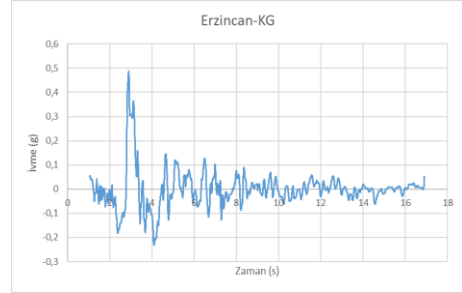
yapısal model 440 adet ölçeklendirilmiş deprem kaydı etkisinde analiz edilmiştir. Maksimum hız (Vmax) Maksimum ivme (Amax)

Tablo 1. Kuvvetli yer hareketi kayıtları.

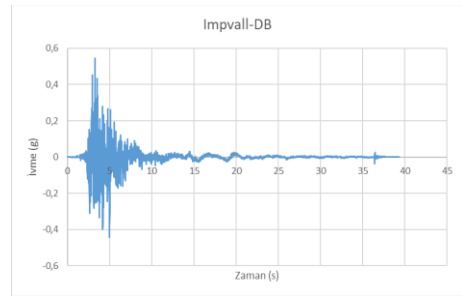
Kayıt No	Yatay Deprem Kaydı	PGA (g)	Vmax / Amax (sec)
1	RSN1614_Düzce-DB	0.527	0.235
2	RSN1614_Düzce-KG	0.584	0.115
3	RSN821_Erzincan-DB	0.479	0.135
4	RSN821_Erzincan-KG	0.489	0.161
5	RSN180_Impvall-DB	0.546	0.054
6	RSN180_Impvall-KG	0.534	0.099
7	RSN1083_Northr-DB	0.131	0.103
8	RSN1083_Northr-KG	0.156	0.105
9	RSN755_LomaP-DB	0.154	0.094
10	RSN755_LomaP-KG	0.477	0.089
11	RSN1633_Manjil_Abbar-DB	0.552	0.072
12	RSN1633_Manjil_Abbar-KG	0.491	0.099
13	RSN4482_L_aquila-DB	0.392	0.079
14	RSN4482_L_aquila-KG	0.451	0.055
15	RSN1108_Kobe-DB	0.283	0.202
16	RSN1108_Kobe-KG	0.313	0.112
17	RSN3475_ChiChi-DB	0.448	0.070
18	RSN3475_ChiChi-KG	0.522	0.065
19	RSN265_Vict-DB	0.618	0.054
20	RSN265_Vict-KG	0.511	0.033
21	RSN4352_UbMarche-DB	0.485	0.068
22	RSN4352_UbMarche-KG	0.366	0.075



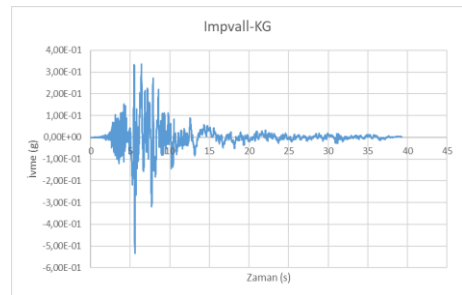
Şekil 15. RSN821_Erzincan-DB



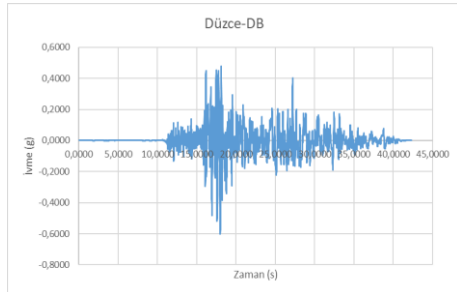
Şekil 16. RSN821_Erzincan-KG



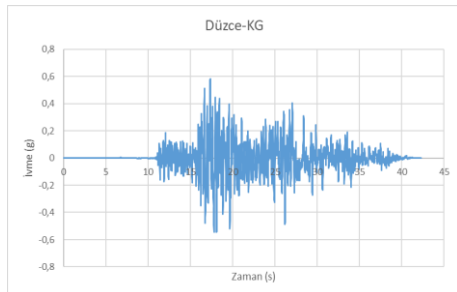
Şekil 17. RSN180_Impvall-DB



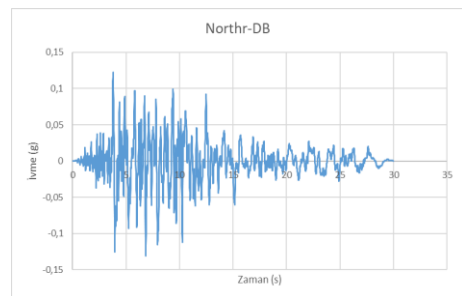
Şekil 18. RSN180_Impvall-KG



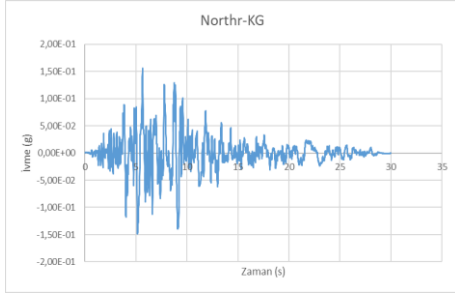
Şekil 13. RSN1614_Düzce-DB



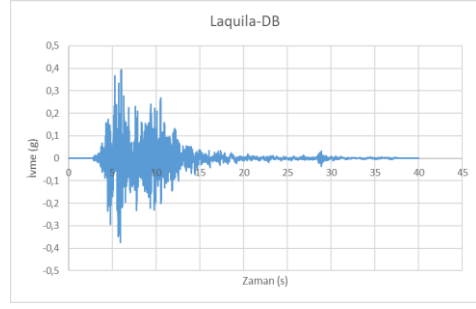
Şekil 14. RSN1614_Düzce KG



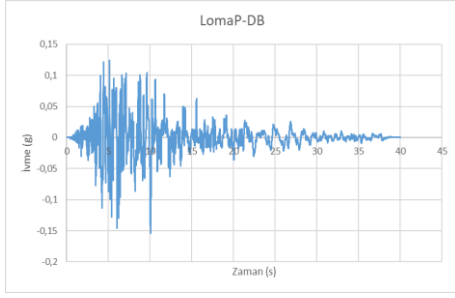
Şekil 19. RSN1083_Northr-DB



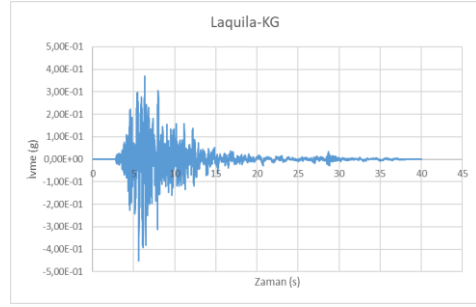
Şekil 20. RSN1083_Northr-KG



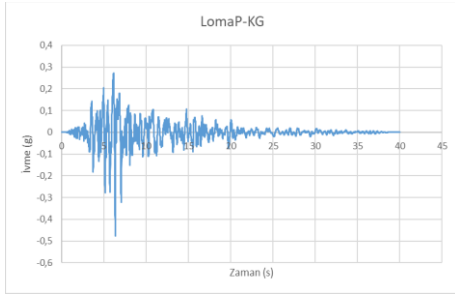
Şekil 25. RSN4482_Laquila-DB



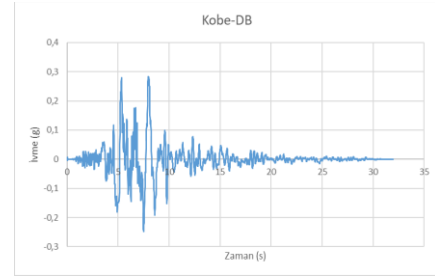
Şekil 21. RSN755_LomaP-DB



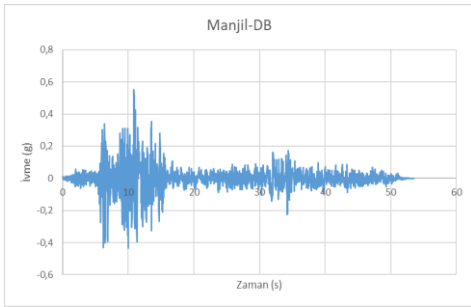
Şekil 26. RSN4482_Laquila-KG



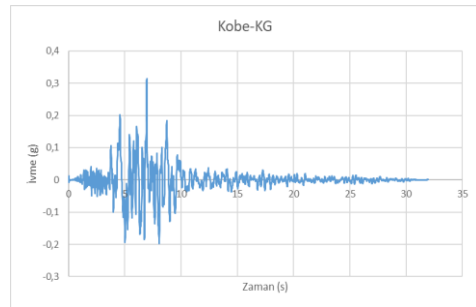
Şekil 22. RSN755_LomaP-KG



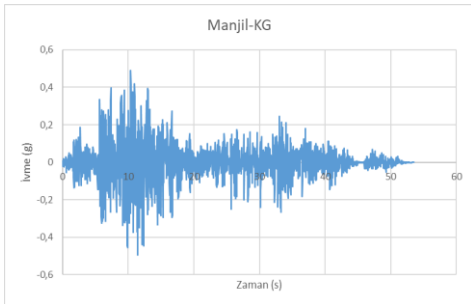
Şekil 27. RSN1108_Kobe-DB



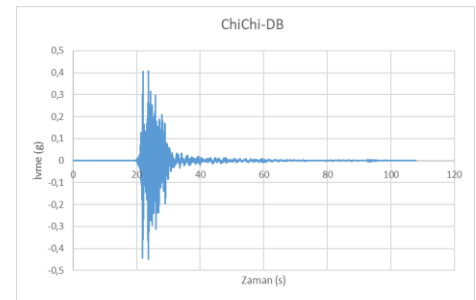
Şekil 23. RSN1633_Manjil_Abbar-DB



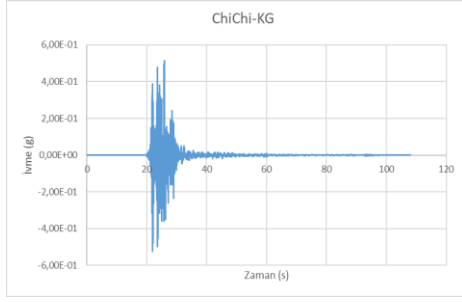
Şekil 28. RSN1108_Kobe-KG



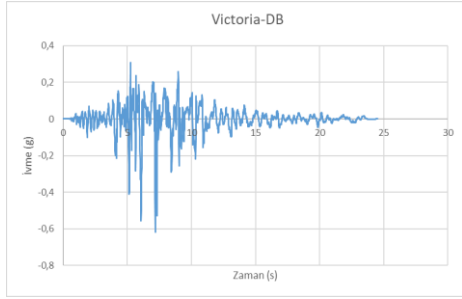
Şekil 24. RSN1633_Manjil_Abbar-KG



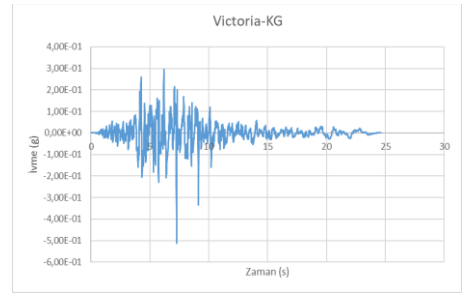
Şekil 29. RSN3475_ChiChi-DB



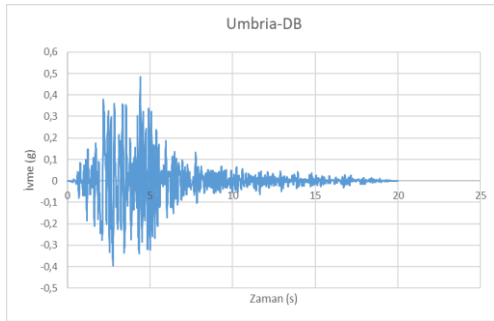
Şekil 30. RSN3475_ChiChi-KG



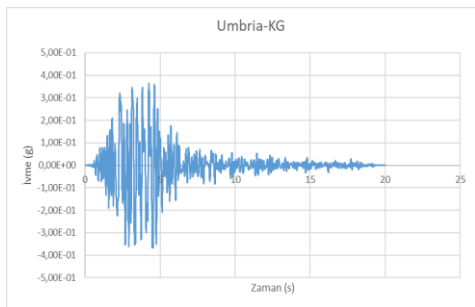
Şekil 31. RSN265_Vict-DB



Şekil 32. RSN265_Vict-KG



Şekil 33. RSN4352_UbMarche-DB

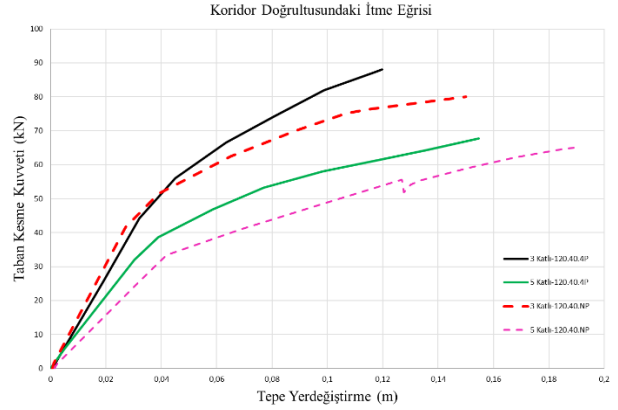


Şekil 34. RSN4352_UbMarche-KG

Araştırma ve bulguları

Doğrusal olmayan itme analizi

Talep yerdeğiştirmeleri göz önüne alınarak doğrusal olmayan statik itme analizleri yenilenmiş, göz önüne alınan her bir yapısal model için koridor yönündeki itme eğrisi elde edilmiş ve karşılaştırılmalı kapasite diyagramları Şekil 35’de sunulmuştur.



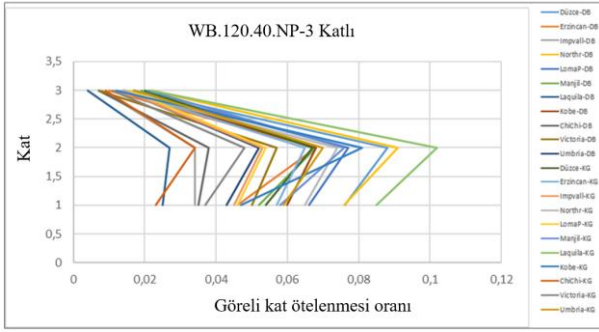
Şekil 35. Koridor doğrultusundaki itme eğrisi.

Şekil 7 ve 8’de verilen 3 ve 5 katlı 4-civatalı WB.120.40.4P yapı modelleri 3 ve 5 katlı kancalı WB.120.40.NP yapı modellerine göre daha çok taban kesme kuvveti taşımakla beraber daha az tepe yerdeğiştirmesi yaptığı tespit edilmiştir. 5 Katlı modellerde taban kesme kuvveti kapasitesi 3 katlı modellere göre daha düşük çıkmakta ama tepe yerdeğiştirmeleri artmaktadır.

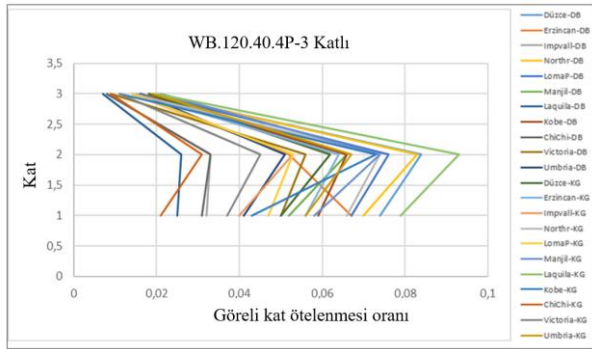
Doğrusal olmayan artımsal itme analizi

IDA görel kat ötelenmesi sonuçları

Bu bölümde deprem kayıtları etkisi altında gerçekleştirilen IDA analizi doğrultusunda elde edilen görel kat ötelenmesi sonuçları yer almaktadır. Seçilen depremlerim maksimum ivme değerleri birbirine yakın olsa da Tablo 1 ‘de gösterildiği üzere kayıtların frekans içeriğini tanımlayan bir parametre olan V_{max} / A_{max} oranı açısından değerlendirildiğinde farklılıklar göstermektedir. Kuvvetli yer hareketi kayıtlarının frekans içeriklerindeki bu farklılık Şekil 36 ile Şekil 39 arasında verilmiş olan görel kat ötelenmeleri dağılımlarında kendini göstermektedir. İlgili şekilllerde görüldüğü üzere modellerde en fazla görel kat ötelenmesi oranı ikinci katta gözlemlenmiştir. 3 katlı yapısal modellerde kancalı (WB.120.40.NP) ve 4 civatalı (WB.120.40.4P) bağlantıların grafiklerine bakıldığında kancalı birleşimlere sahip modelin görel kat ötelenmesi oranı 4 civatalı modele göre daha fazladır. Buradan da anlaşıldığı üzere bağlantıların moment taşıma kapasiteleri arttıkça yapısal modellerin yer değiştirmeleri azalmaktadır.

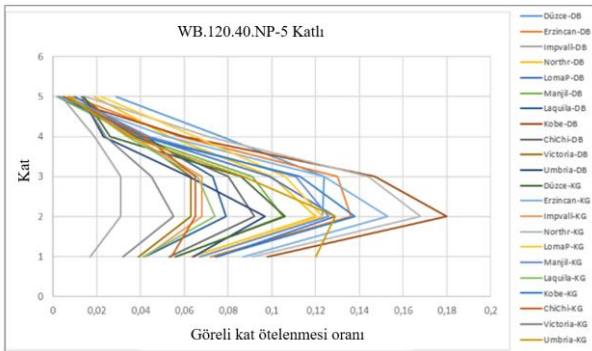


Şekil 36. 3 Katlı model görel kat ötelenmesi oranı değişimi (WB.120.40.NP)

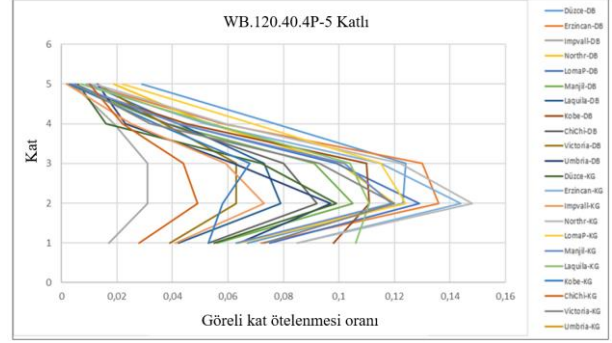


Şekil 37. 3 Katlı model görel kat ötelenmesi oranı değişimi (WB.120.40.4P)

5 katlı yapısal modellerde de kancalı (WB.120.40.NP) ve 4 civatalı (WB.120.40.4P) bağlantıların grafiklerine bakıldığında kancalı birleşimlere sahip modelin görel kat ötelenmesi oranı 4 civatalı modele göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Buna ek olarak kat sayısı arttıkça katlara ait görel kat ötelenmesi oranında artış gözükülmektedir.

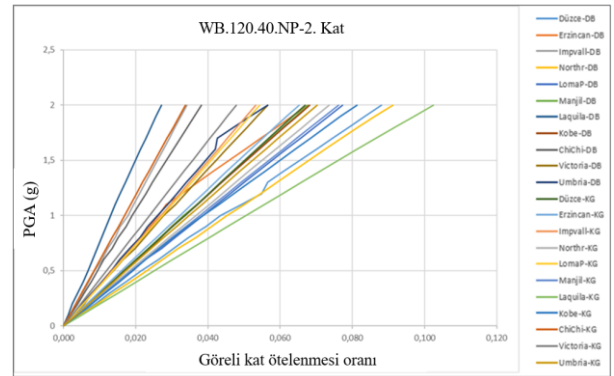


Şekil 38. 5 Katlı model görel kat ötelenmesi oranı değişimi (WB.120.40.NP).

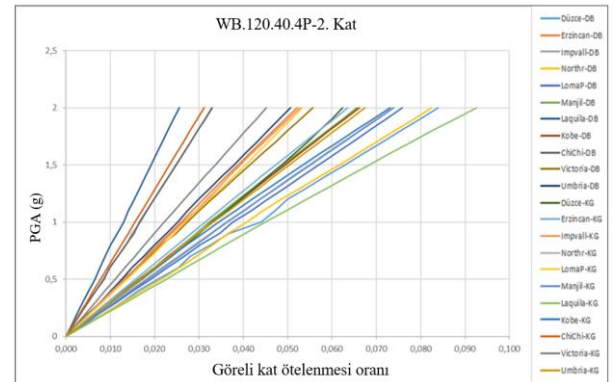


Şekil 39. 5 Katlı model görel kat ötelenmesi oranı değişimi (WB.120.40.4P).

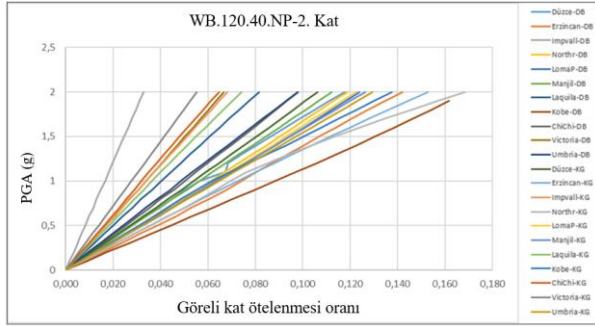
Çalışma kapsamında göz önüne alınan yapısal modeller için elde edilen IDA eğrileri en fazla kat ötelenme oranının meydana geldiği 2.kat için Şekil 40 ile 43 arasında verilmiştir.



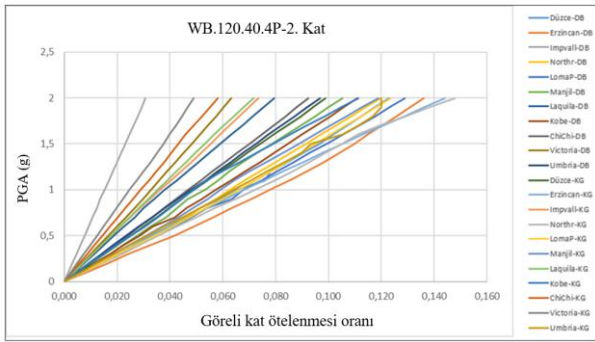
Şekil 40. Seçilen 22 deprem kaydı etkisinde 3 katlı modele ait 2. kat görel kat ötelenmesi IDA eğrileri (WB.120.40.NP).



Şekil 41. Seçilen 22 deprem kaydı etkisinde 3 katlı modele ait 2. kat görel kat ötelenmesi IDA eğrileri (WB.120.40.4P).



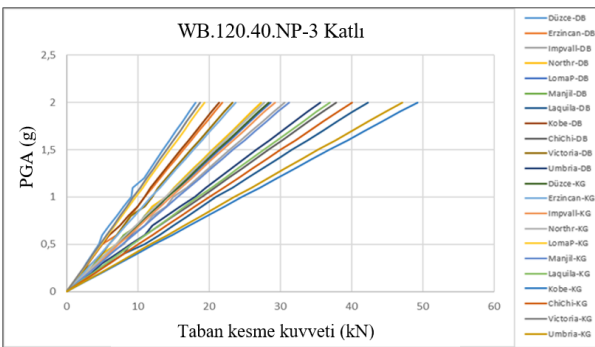
Şekil 42. Seçilen 22 deprem kaydı etkisinde 5 katlı modele ait 2. kat görel kat ötelenmesi IDA eğrileri (WB.120.40.NP)



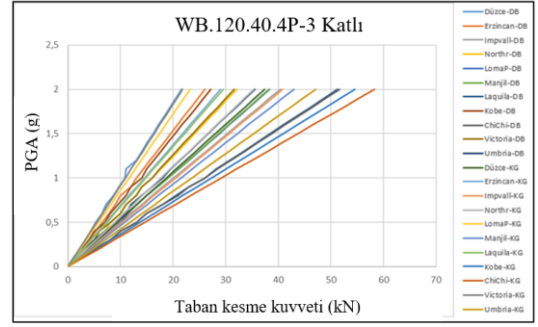
Şekil 43. Seçilen 22 deprem kaydı etkisinde 5 katlı modele ait 2. kat görel kat ötelenmesi IDA eğrileri (WB.120.40.4P)

IDA görel kat ötelenmesi sonuçları

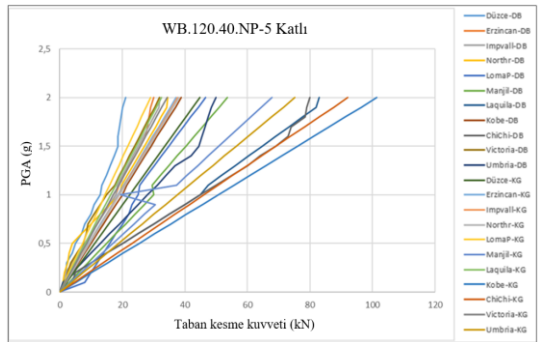
Bu bölümde deprem kayıtlarına göre elde edilen taban kesme kuvveti sonuçları yer almaktadır. 3 ve 5 katlı yapısal modellerde kancalı (WB.120.40.NP) ve 4 civatalı (WB.120.40.4P) bağlantıların grafiklerine bakıldığında kancalı birleşimlere sahip modellerin taban kesme kuvvetleri 4 civatalı modellerde daha azdır. Buna ek olarak kat sayısı arttıkça taban kesme kuvvetinde artış gözükmemektedir. Çalışma kapsamında göz önüne alınan yapısal modeller için elde edilen IDA taban kesme kuvveti eğrileri Şekil 44 ile 47 arasında verilmiştir.



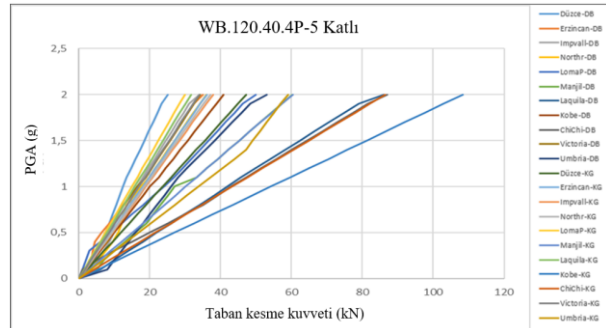
Şekil 44. Seçilen 22 deprem kaydı etkisinde 3 katlı modele ait taban kesme kuvveti IDA eğrileri (WB.120.40.NP).



Şekil 45. Seçilen 22 deprem kaydı etkisinde 3 katlı modele ait taban kesme kuvveti IDA eğrileri (WB.120.40.4P).



Şekil 46. Seçilen 22 deprem kaydı etkisinde 5 katlı modele ait taban kesme kuvveti IDA eğrileri (WB.120.40.NP).



Şekil 47. Seçilen 22 deprem kaydı etkisinde 5 katlı modele ait taban kesme kuvveti IDA eğrileri (WB.120.40.4P)

Kırılgenlik analizi

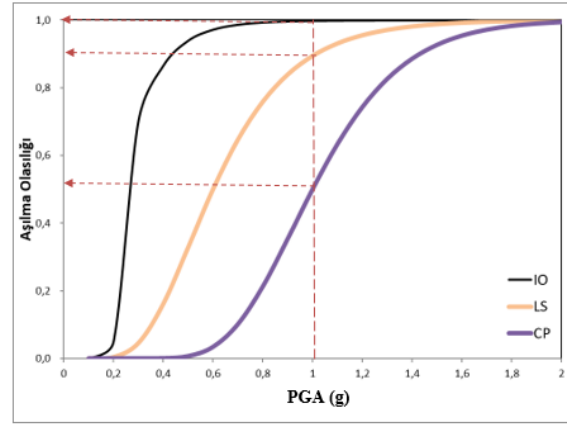
Kırılgenlik analizi deprem etkisi altındaki yapısal performansını değerlendirmeyi amaçlamakta ve özellikle son yıllarda binaların risk analizlerinin belirlenmesi amacıyla çok sayıda araştırmacının ilgi alanına girmiş bulunmaktadır. Kırılgenlik eğrilerinin yapısal performans değerlendirmesinde kullanılmıyola hasar analizlerinin yapılması çok daha güvenilir olmaktadır. Özdele bir yapı genelde ise bir yapı stoku göz önüne alınarak kırılgenlik eğrilerinin geliştirilmesi için temel olarak yapısal kapasite limitlerine (hasar sınır durumlarına) ve yer hareketi şiddet parametresinin ölçüsü olan talep modellerine ihtiyaç vardır.

Kırılgnlık, belirli bir sismik risk altında tanımlanan deprem etkisinde, belirli bir mühendislik talep parametresinin sınır durumunun aşılmasının koşullu olasılığı olarak tanımlanmaktadır. Genellikle analitik yöntemler kullanılarak elde edilen bu eğriler tanımlanan bir hasar limit durumunun aşılma olasılığını bir yer hareketi şiddet parametresi ile ilişkilendirmektedir.

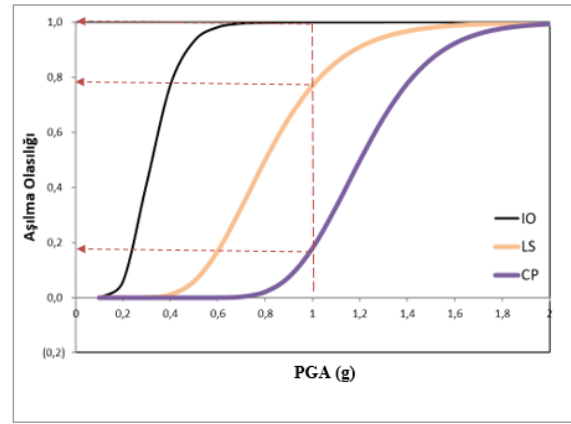
Kırılgnlık analizinde en temel unsur yapısal kapasite limitlerine ait hasar sınır durumlarının tanımlanmış olmasıdır. Bu çalışma kapsamında yapılan araştırmalarda, depo raf sistemlerine ait tanımlı yapısal hasar sınırlarının olmamasından dolayı, doğrusal olmayan statik analiz yöntemi uygulanarak elde edilen yapısal kapasite eğrileri doğrusal olmayan artımsal dinamik analiz sonuçları ile birlikte değerlendirilmiştir. Kesme kuvvet kapasiteleri, ötelenme oranları ve moment-dönme ilişkileri gözönüne alınarak yapılan değerlendirmeler neticesinde hasar sınırları belirlenmeye çalışılmıştır. Şekil 3’de görülen 3 sınır durum göz önüne alınmıştır: hemen kullanım (IO), can güvenliği (LS) ve göçme öncesi (CP). Bu hasar durumları için belirlenen sınırlar sırasıyla %0,6, %1,6 ve %3,0’ dır. Hemen kullanım performans seviyesini işaret etmekte olan limit durum için 3- ve 5-katlı yapısal modellerde ortalama olarak kuvvet kapasitesinin sırasıyla %50, %52 mertebelerine ulaştığı değerlendirilmiştir. Can güvenliği sınır durumu olarak kabul edilen noktada ise kuvvet kapasitesinde sırasıyla %80, %84 mertebelerinde ulaşılmaktadır. Literatürde çelik depo raf sistemlerinin deprem davranışlarını belirlemek amacıyla FEMA 356’da moment aktaran çelik çerçeveler için görel kat ötelenmesi göz önüne alınarak belirtilmiş olan hasar limit değerleri kullanılmıştır [12]. Bu sınır değerler hemen kullanım (IO) için %0,7, can güvenliği (LS) için %2,5 ve göçme öncesi (CP) için %5,0’dır. Merkezi çaprazlı sistemler için bu sınır değerler sırasıyla %0,5, %1,5 ve %2,0’ dir. Buradan da görüldüğü üzere yapılan bu çalışma kapsamında belirlenmiş olan sınır değerler moment aktaran ve merkezi çaprazlı çerçeveler için tanımlanmış olan sırasıyla %0,7 (IO), %2,5 (LS), %5,0 (CP) ve %0,5 (IO), %1,5 (LS), %2,0 (CP) hasar limit durumlarının arasında kalmaktadır. Göz önüne alınan yapısal modeller incelendiğinde elde edilen bu bulgunun uygun olduğu değerlendirilmiştir.

Çalışmanın son aşamasında belirlenen hasar limit durumları göz önüne alınarak kırılgnlık analizleri gerçekleştirilmiş ve bu amaçla olasılıksal yaklaşım kullanılmıştır [13]. Şekil 48 ile 51 arasında görüldüğü gibi kırılgnlık eğrileri elde edilmiştir. 3-katlı kancalı bağlantılı (WB.120.40.NP) modeller için maksimum yer ivmesinin 1.0 g olması durumunda, hemen kullanım (IO), can güvenliği (LS) ve göçme öncesi (CP) hasar limit durumlarının aşılması olasılıkları sırasıyla %100, %89 ve %50 olduğu görülmektedir. 3- katlı 4 civata bağlantılı (WB.120.40.4P) modeller için maksimum yer ivmesinin 1.0 g olması durumunda, hemen kullanım, can güvenliği ve göçme öncesi hasar limit durumlarının aşılması olasılıkları sırasıyla olasılıkları sırasıyla %100, %77 ve %18 olduğu görülmektedir. 5- katlı kancalı bağlantılı (WB.120.40.NP) modeller için maksimum yer ivmesinin 1.0 g olması durumunda, hemen kullanım, can güvenliği ve göçme

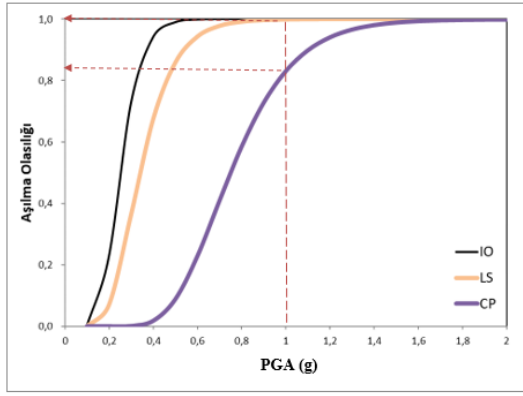
öncesi hasar limit durumlarının aşılması olasılıkları sırasıyla %100, %100 ve %83 olduğu görülmektedir. 5-katlı 4-civatalı bağlantılı (WB.120.40.4P) modeller için maksimum yer ivmesinin 1.0 g olması durumunda, hemen kullanım, can güvenliği ve göçme öncesi hasar limit durumlarının aşılması %100, %100 ve %74 olduğu görülmektedir. Kırılgnlık eğrileri sonuçları değerlendirildiğinde yapı modelleri teşkil edilirken kancalı bağlantılar yerine 4 civatalı bağlantı kullanılmasının farklı yüksekliğe sahip modellerin yapısal hasar potansiyelini azalttığı bulgusu elde edilmiştir. Kat yüksekliği arttıkça göz önüne alınan her bir sınır durum için hasar görme olasılığının da arttığı kırılgnlık analizi sonuçlarından görülmektedir.



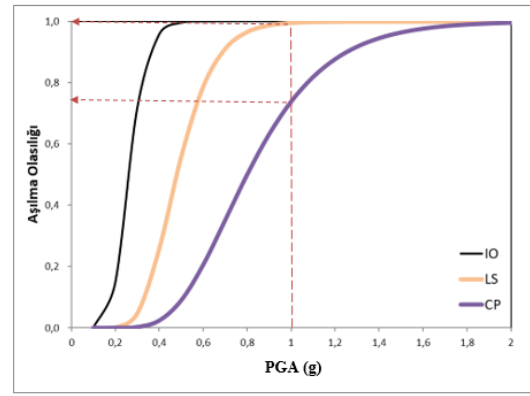
Şekil 48. 3 Katlı model kırılgnlık analiz sonuçları (WB.120.40.NP)



Şekil 49. 3 Katlı model kırılgnlık analiz sonuçları (WB.120.40.4P)



Şekil 50. 5 Katlı model kırılma analiz sonuçları (WB.120.40.NP)



Şekil 51. 5 Katlı model kırılma analiz sonuçları (WB.120.40.4P)

Sonuç

Depo raf sistemleri lojistik tedarik zincirinin en önemli unsurlarındandır. Kiriş-kolon bağlantı tipleri ve yapı yüksekliği, sismik yükleme altında sistemin genel performansında önemli bir rol oynamaktadır. Bu tez kapsamında 3- ve 5-katlı yapısal modellerde kolon-kiriş bağlantı detayının yapısal davranışa etkisinin incelenmesi amacıyla 2 tip bağlantı detayı göz önüne alınmış ve ilgili bağlantılar 4 cıvatalı (WB. 120.40.4P) ve kancalı (WB.120.40.NP) bağlantılar olarak belirlenmiştir. Sonlu elemanlar programı olan SAP2000 ile sayısal modeller kurulmuş ve analizler gerçekleştirilmiştir. Değerlendirmede doğrusal olmayan statik itme analizi ve doğrusal olmayan dinamik itme analizi yöntemleri kullanılmıştır. Doğrusal olmayan statik itme analizi yöntemine göre elde edilen sonuçlar;

3-katlı yapısal modellerin taban kesme kuvveti taşıma kapasiteleri 5-katlı modellere göre daha fazla, 3-katlı modellerin tepe deplasman talep değerleri 5-katlı modellere göre daha az olduğu görülmektedir. Buradan elde edilen sonuçlara göre 3-katlı modellerin 5-katlı modellere göre daha rijit bir yapısal taşıyıcı sisteme sahip oldukları söylenebilir.

Kaynakça

- [1] N. Baldassino, C. Bernuzzi, "Analysis and Behaviour of Steel Storage Pallet Racks" Thin-Walled Structures, 37(4), 277-304, 2000.
- [2] C. Aguirre, "Seismic behaviour of Rack Structures", Journal of Constructional Steel Research 61:607-624, 2004. doi:10.1016/j.jcsr.2004.10.001
- [3] K.M. Bajoria, K.K. Sangle and R.S. Talicotti "Modal Analysis of Cold-formed Pallet Rack Structure with Semi-rigid Connections", Journal of Constructional Steel Research 66:428-441, 2010. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2009.10.005
- [4] L. Dai, X. Zhao and K.J.R. Rasmussen, "Cyclic Performance of Steel Storage Rack Beam-to-Upright Bolted Connections", Journal of Constructional Steel Research 148:28-48, 2018.
- [5] A. Filiatrault, E.B. Robert and M.G. Mahoney, "Performance-Based Seismic Design of Pallet-Type Steel Storage Racks", Earthquake Spectra 22(1), 2006.
- [6] F. Petrone, P.S. Higgins, N.P. Bissonnette, A.M. Kanvinde, "The Cross-Aisle Seismic Performance of Storage Rack Base Connections", Journal of Constructional Steel Research 122:520-31, 2016.

- [7] L. Yin, G. Tang, Z. Li, M. Zhanga and B. Feng, "Responses of Cold-Formed Steel Storage Racks with Spine Bracings Using Speed-Lock Connections with Bolts I: Static Elastic-Plastic Pushover Analysis", *Thin-Walled Structures* 125(January):51–62, 2018.
- [8] L. Yin, G. Tang, Z. Li and M. Zhang, "Responses of Cold-Formed Steel Storage Racks with Spine Bracings Using Speed-Lock Connections with Bolts II: Nonlinear Dynamic Response History Analysis", *Thin-Walled Structures* 125(January):89–99, 2018.
- [9] B. Elkadi, "Behavior of Cold Formed, Thin-Walled, Rack Type Frames and Their Use in Building Structures", PhD, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, 2019
- [10] G. Gabbianelli, F. Cavalieri, R. Nascimbene, "Seismic Fragility Curves of Steel Storage Pallet Racks", *SPONSE – 4th International Workshop on the Seismic Performance of Non-Structural Elements* 363–77, 2019
- [11] M. Jaradat, "Investigation of Industrial Storage Rack Systems Under Earthquake Loads", Msc, Gebze Technical University, 2020.
- [12] N. Asawasongkram, P. Chomchuen, P. Premthamkorn, "Seismic Performance Evaluation of Steel Storage Racks Using Experimental Results of Beam-to-Column Connection", *Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Istanbul, 2014.
- [13] J.W. Baker, "Efficient Analytical Fragility Function Fitting Using Dynamic Structural Analysis", *Earthquake Spectra* 31(1):579–99, 2015.
- [14] BS EN 16681:2016, BSI Standards Publication *Steel Static Storage Systems — Adjustable Pallet Racking Systems — Principles for Seismic Design.*, British Standards Institution.
- [15] BS EN 15512:2009, *Steel Static Storage Systems — Adjustable Pallet Racking Systems — Principles for Structural Design.*, British Standards Institution.
- [16] Eurocode 3. Design of Structures for Earthquake Resistance, EN 1998-1, Part 1, General rules, seismic actions and rules for buildings.
- [17] Eurocode 3. Design of Structures for Earthquake Resistance, EN 1998-1, Part 1, General rules, seismic actions and rules for buildings.
- [18] FEMA-273, *NHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Federal Emergency Management Agency, 1997.
- [19] FEMA-356, *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Federal Emergency Management Agency, 2000.
- [20] FEMA-440, *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*, Federal Emergency Management Agency, 2005.
- [21] RMI, *Specification for the Design, Testing and Utilization of Industrial Steel Storage Racks*, Rack Manufacturers Institute, 2012.
- [22] TBDY, *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*, Türk Standartları Enstitüsü, 2018.
- [23] ATC-40, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings Volume 1* by Applied Technology Council, California Seismic Safety Commission.
- [24] D. Vamvatsikos, C.A. Cornell, "Incremental Dynamic Analysis", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2002.



Çift tabakalı çelik uzay kafes kubbe sistemlerinin yapısal performansının incelenmesi

Evaluation of structural performance of double layer steel space lattice dome systems

Mehmet Ali Bektaş^{1*}, Mehmet Sedat Hayalioğlu²

¹ Çetinkayalar Yapı Elemanları A.Ş. Araştırma ve Geliştirme Merkezi, Diyarbakır bektas1026@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9688-4491>

² Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, hshedat@dicle.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9399-235X>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 13 Eylül 2023
Revizyon 23 Ekim 2023
Kabul 7 Mart 2024
Online 29 Mart 2024

Anahtar Kelimeler:

*Uzay kafes
Çelik kubbe
Yapısal analiz
Yapısal tasarım*

ÖZ

Bu makalede, çift katmanlı çelik uzay kafes kubbe sisteminin analizi ve tasarımı üzerine yapılan bir çalışmanın sonuçları sunulmaktadır. Çalışmada; Eurocode-1 yönetmeliği ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 esas alınarak yapıya etki eden yüklerin hesaplamaları ayrıca AISC 360-10 yönetmeliğine göre boyutlandırılmaları gerçekleştirilmiştir. AISC 360-10, Türk Çelik Yapılar Tasarım Yönetmeliği ile büyük oranda aynıdır ve YDKT (Yük ve Dayanım Katsayılarına göre Tasarım) de LRFD (Load and Resistance Factor Design) ile benzerlik gösterir. Elde edilen sonuçlar, kubbe sisteminin çember kirişlerinin etek bölümlerinde en yüksek çekme gerilmesine, tepe bölümlerinde ise en yüksek basınç gerilmesine sahip olduğunu göstermekte iken radyal kirişlerde ise en yüksek basınç gerilmesi etek bölümünde oluşmaktadır. Çift katmanlı kubbe sistemlerinde ayrıca, asimetrik yük altında kubbe sistemindeki tüm çubukların farklı çekme ve basınç gerilmelerine maruz kalabileceği tespit edilmiştir. Bu nedenle, tasarım aşamasında çubuklar hem çekme hem de basınç gerilmelerine göre uygun şekilde boyutlandırılmalıdır. Çift katmanlı çelik uzay kafes kubbe sistemlerinin analizi ve tasarımıyla ilgilenen mühendisler için bu çalışma önemli bir rehber niteliğindedir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 13 September 2023
Received in revised form 23 October 2023
Accepted 7 March 2024
Available online 29 March 2024

Keywords:

*Space truss
Steel dome
Structural analysis
Structural design*

ABSTRACT

This article presents the results of a study on the analysis and design of a double-layer steel space lattice dome system. In the study; Based on the Eurocode-1 regulation and the Turkish Building Earthquake Code 2018, the calculations of the loads acting on the structure were also carried out according to the AISC 360-10 regulation. AISC 360-10 is largely the same as Turkish Steel Structures Design Regulation and YDKT (Yüksek ve Dayanım Katsayılarına göre Tasarım) is also similar to LRFD (Load and Resistance Factor Design). The results obtained show that the dome system has the highest tensile stress in the skirt parts of the circle beams and the highest compressive stress in the top parts, while the highest compressive stress in the radial beams occurs at the skirt part. Double-layer dome systems It has also been determined that all bars in the dome system can be subjected to different tensile and compressive stresses under asymmetrical load. Therefore, at the design stage, the bars must be sized appropriately for both tensile and compressive stresses. This study is an important guide for engineers interested in the analysis and design of double-layer steel space lattice dome systems.

Doi: 10.24012/dumf.1359519

* Sorumlu Yazar

Giriş

Mimari tasarımlarda, geniş açıklıklı ve yapısal elemanları azaltılmış tasarımlar tercih edilmektedir. Bu nedenle, mimarlar ve mühendisler sürekli olarak geniş açıklık ve az elemanlı yapı sistemlerinin tasarımı üzerinde çalışmaktadırlar. Bu tasarım hedefleri doğrultusunda, uzay kafes sistemleri önemli bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Uzay kafes sistemleri, geniş açıklıklı ve hafif olmaları sebebiyle birçok yapıda kullanılmaktadır. Örneğin, alışveriş merkezleri, tiyatrolar, stadyumlar, spor salonları, toplantı salonları ve sanayi yapıları gibi yapılarda geniş açıklıklı sistemlere sıklıkla rastlanmaktadır.

Tarihsel olarak, kubbe sistemleri mimarlar ve mühendisler tarafından çelik elemanlar kullanılmadan önce farklı yöntemlerle tercih edilmiştir. İlk kubbe sistemleri taş, tuğla ve ahşap gibi malzemelerden yapılmış ve daha dar açıklıklı olarak inşa edilmiştir. Örneğin, MS 120 İmparator Hadrian tarafından Roma'da yapılan Pantheon Tapınağı, tarihteki önemli kubbe yapılarından biridir. Bu tapınağın kubbesi daire plan üzerine oturtulmuştur. Daha sonra, nitelikli harçlar ve farklı malzemelerin kullanımıyla birlikte daha geniş açıklıklı kubbeler tasarlanmıştır.

Kubbe sistemlerinin gelişimi, malzeme teknolojilerinin ilerlemesiyle paralel bir şekilde ilerlemiştir. Betonarme kubbeler zamanında daha geniş açıklıklı olmalarına rağmen, yapım süresi ve yapı ağırlığını arttırması gibi nedenlerle çelik endüstrisinin gelişmesiyle çelik kubbeler tercih edilmeye başlanmıştır. Çelik kubbeler, hafiflikleri, düşük maliyetleri ve imalat kolaylıkları sayesinde mühendisler için daha cazip hale gelmiştir. Uzay kafes sistemleri ise farklı biçim ve oluşum sistemlerine sahiptir. Bunlardan biri kubbe formundaki uzay kafes sistemleridir. Kubbe formundaki uzay kafes sistemleri, döneleli yüzey üzerinde bulunan eliptik yay veya çift eğrilikli çubuk sistemlerinden oluşmaktadır.

Bu çalışmada, çift katmanlı çelik uzay kafes kubbe sisteminin analizi ve tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu sistem, iki katmanlı bir çelik ağ örgüsünden oluşur ve bu özgün yapı, yüksek dayanıklılığı ve görsel estetiği bir araya getirir. Kubbe geometrisi, yapıya yüksek bir taşıma kapasitesi sağlarken, iç mekânlarda geniş ve kolonsuz bir kullanım alanı sunar. Çalışmada SAP2000 programı kullanılarak, öncelikle kabul edilen konum özellikleri ve malzeme özellikleri göz önünde bulundurularak, Eurocode yönetmeliği doğrultusunda Sabit yük, kar yükü [1] ve rüzgâr yükü [2] hesaplamaları yapılmış ve programa tanımlanmıştır. Bu hesaplamalar, yapıya etki eden dış yüklerin belirlenmesini sağlamıştır. Daha sonra, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'e [3] göre deprem yükü etkisi dikkate alınmıştır. Deprem yükü hesaplamaları, yapıya deprem hareketlerinden kaynaklanan etkilerin değerlendirilmesini sağlamış ve yapıya dayanıklılık sağlayacak tasarım önlemleri alınmıştır. Ardından, Türk çelik yapılar tasarım yönetmeliğine [4] büyük oranda benzeyen AISC 360-10 [5] yönetmeliği kullanılarak, kubbe elemanları boyutlandırılmıştır. Bu adım, yapısal elemanların uygun

boyutlara sahip olmasını ve taşıma kapasitesini karşılamaını sağlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Son olarak, elde edilen kubbe modelinin yük dağılımı ve kritik yük oluşun bölgeleri incelenmiştir. Bu analizler, kubbe geometrisinden kaynaklanan önemli bilgileri ortaya çıkarmış ve yapısal tasarımın geliştirilmesine katkı sağlamıştır.

Bu çalışma, çift katmanlı çelik uzay kafes kubbe sisteminin analiz ve tasarım sürecini ayrıntılı bir şekilde ele almaktadır. Sonuçlar, benzer yapıların tasarımı ve inşasıyla ilgilenen mühendisler ve araştırmacılar için değerli bir kaynak oluşturmaktadır. Ayrıca, çelik yapıların kullanıldığı farklı uygulama alanlarında daha güvenli ve dayanıklı yapılar inşa etmek için bu çalışmanın sağladığı yöntemler ve sonuçlar önemli bir rehber niteliği taşımaktadır. Bu çalışma, çelik kubbelerin analizi konusunda gelecekte yapılacak araştırmalara katkı sağlamak ve bir temel oluşturmayı hedeflemektedir.

Çelik kubbelerin analizi konusunda yapılan önemli çalışmalardan bazıları şunlardır: Timoshenko ve Woinowsky-Kriger [6] "Plak ve Kabukların Teorisi" kitabında kubbe sistemleri üzerinde gerilmelerin dağılımı ve deplasman tespiti için hesap yöntemlerini ortaya koymuştur. Timoshenko [7] "Elastik Burkulma Teorisi" kitabında kabuk elemanlarda oluşan burkulma sorununa çeşitli çözümler sunmuş ve kabuk elemanların maksimum yük noktasından önce de burkulma olabileceğini göstermiştir. Papadopoulos ve LoRico [8] Bükreş Ulusal Ekonomi Köşkü'nün çelik kubbesinin burkulma ve ters dönme sorunlarını incelemiş ve düzensiz dağılmış kar yükünün bölgesel burkulmaya yol açtığını ortaya koymuştur. Soykan [9] çember, elips ve parabol eğrilik form tiplerine sahip kubbelerin stabilitesi, deplasmanları ve birim alan ağırlığını karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Çiftçi [10] uzay kubbe sistemlerindeki geometrik deformasyon ve doğrusalsızlığın stabilize üzerindeki etkilerini belirlemiştir. Karabulut [11] geniş açıklıklı uzay kafes çatı sistemlerinin boyutlandırılmasını ve tasarım esaslarını incelemiştir. Kara [12] farklı yükseklik/açıklık oranlarına sahip tek katmanlı kubbelerin performansını ve maliyet analizlerini karşılaştırmıştır. Özcan [13] nervürlü ve schwedler tipi kubbelerin asimetric yüklerden kaynaklanan stabilitesini incelemiş ve schwedler tipi kubbenin daha rijit davrandığını belirlemiştir. Yılmaz [14] tek katmanlı kubbe sistemlerinin stabilitesini kiriş berkitmeleri kullanarak analiz etmiş ve yapı ağırlığında ciddi düşüşler elde edilebileceğini göstermiştir. Adnanoğlu [15] ribbed ve schwedler kubbe sistemlerine dayanan ekonomik ve dayanıklı kubbe tasarımları için parametrik bir çalışma yapmıştır. Wang ve Jiang [16] farklı tasarım stillerine sahip küresel yapıların rüzgâr yüklerini sistematik olarak incelemiş ve tasarım önerileri sunmuştur. Bektaş [17] çalışmasında, farklı yükseklik/açıklık oranlarına sahip tek katmanlı ve çift katmanlı çelik uzay kafes kubbe sistemleri oluşturmuş daha sonra bu sistemleri AISC-360-10 yönetmeliğine göre tasarladıktan sonra Türk çelik yapılar tasarım yönetmeliğine göre kontrol etmiştir. Elde ettiği sonuçların aynı ya da yakın olduğunu göstermiştir.

Yapılan literatür araştırmasında, kubbe sistemlerinin yapısal performansını inceleyen çalışmaların yetersiz olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, bu çalışma çift katmanlı çelik uzay kubbe sisteminin yapısal performansını detaylı bir şekilde inceleyerek, bu kubbe sistemlerinin tasarımından kaynaklanan performanslarını araştırmayı amaçlamaktadır.

Materyal ve Metot

Kubbe Formundaki Uzay Kafes Sistemlerinin Sınıflandırılması

Kubbe formundaki uzay kafes sistemleri, çift eğrilikli yüzeye sahip tek tabakalı ya da çok tabakalı olarak tasarlanabilen taşıyıcı eleman ve düğüm noktalarından oluşan ve aldığı yükü tüm çubuklara dağıtan taşıyıcı sistemlerdir. Bu formdaki uzay kafesleri, ana tasarım tiplerine göre ayrılabilir. Başlıca kubbe formundaki uzay kafes sistemleri şunlardır:

1. Radyal nervürlü kubbe sistemleri: Radyal nervürlü kubbe sistemleri, kubbe merkezinin dikey eksen etrafında radyal olarak dönen kemerlerden oluşan bir tasarımı kullanır. Bu kemerler, çubuk elemanlarının birleştiği düğüm noktalarında kesişir. Radyal nervürlü kubbeler genellikle küçük açıklıklı alanları örtmek için tercih edilir. Montaj kolaylığı sağlar ve maliyet açısından avantajlıdır. Ancak geniş açıklıklar için daha büyük kesit gerekliliği nedeniyle yüksek maliyet ve daha zor montaj gerektirebilir.
2. Schwedler kubbe sistemleri: Schwedler kubbe sistemleri, 19. yüzyılda Alman inşaat mühendisi Johann Wilhelm Schwedler tarafından geliştirilmiştir. Bu kubbe türü, simetrik olmayan yükleri güvenle alabilmesi için diyagonal nervürler kullanarak tasarlanır. Schwedler kubbeler, büyük açıklıklara sahip yapılar için ideal bir çözüm sunar. Radyal nervürlerin yanı sıra yatay halkalar ve yay kirişlerinin birleşim bölgelerindeki yamuk alanlar da diyagonal elemanlarla bölünmüştür. Bu yapı, yük transferini destekler ve döngüsel simetride olan nervür kirişlerini birleştiren eş merkezli halkaları daha güvenli hale getirir.
3. Lamella kubbe sistemleri: Lamella kubbe sistemleri, Alman mimar F. Zollinger tarafından 1906 yılında geliştirilmiştir. Bu sistemde, kubbenin çubuk elemanları eşkenar dörtgenlere benzeyen lamella levhaların birleşimiyle oluşturulur. Lamella levhaları, kubbenin yüzeyinde bulunur ve kubbenin stabilitesini artırır. Alt kısımda çekme çemberi ve üst kısımda basınç çemberi bulunur ve gerilmelerin dağıtılmasını sağlar. Lamella kubbeler, yüksek rüzgar yüklerine karşı dayanıklıdır ve geniş açıklıklı yapılar için tercih edilir.
4. Jeodezik kubbe sistemleri: Jeodezik kubbe sistemleri, giriş ve düzlemlerin geometrik şekillerle oluşturduğu bir sistemdir. Bu sistemde kemer sistemi yerine jeodezik yapılar kullanılır. Jeodezik kubbeler, küresel kubbe şeklinde olabilir ve yükü kendi içinde dağıtarak taşıma işlevini gerçekleştirir. Kubbe alt halkası farklı bir taşıyıcı eleman üzerine veya doğrudan zemin üzerine yerleştirilebilir.

Jeodezik kubbeler, geniş açıklıklara kadar montajı yapılabilmesi nedeniyle kullanım alanı geniştir.

5. Üç doğrultuda ızgara kubbe sistemleri: Üç doğrultuda ızgara kubbe sistemleri, çubuk elemanlarının eşit geometrilerden oluştuğu bir tasarıma sahiptir. Bu sistemde, kubbenin çubuk elemanları ana kirişlerle birbirine bağlanır ve ikincil çubuk elemanlarıyla desteklenir. Bu şekilde yükler uniform bir şekilde dağıtılır. Üç doğrultuda ızgara kubbeler, farklı geometrik formlarda tasarlanabilir ve ağırlık ve alan dağılımı açısından verimlidir. Büyük açıklıklı yapılarda kullanımı yaygındır.

Kubbe Formundaki Uzay Kafes Bileşenleri

Uzay kafes sistemleri, birçok bileşenden oluşur. Bu bileşenler, sistemin bir arada tutulmasını sağlar ve bir bütün olarak çalışmasını mümkün kılar. Bu uzay kafes sistemlerinin bileşenlerinin detayları:

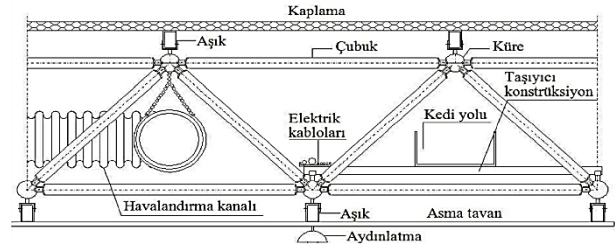
1. Çubuklar: Uzay kafes sistemlerindeki temel taşıyıcı elemanlardır. Bu sistemlerde, çubuklar yükleri aksel (axial) ve moment (bükme momenti) olarak taşıy ve aynı zamanda iki düğüm noktasını birbirine bağlar. Çubukların malzemesi ve kesit şekli, taşıması gereken yükler, uzunluk, dayanıklılık ve diğer performans kriterleri göz önünde bulundurularak seçilir. Çubukların farklı malzemelerden yapılması, farklı mühendislik gereksinimlerine cevap verebilme yeteneğini artırır. Yaygın olarak kullanılan malzemeler arasında çelik, betonarme, alüminyum ve ahşap bulunur. Her bir malzemenin kendine özgü özellikleri ve avantajları vardır. Çubukların kesit şekli de önemlidir çünkü kesit şekli, çubuğun taşıyabileceği yükleri, bükme momentini ve diğer mekanik özellikleri etkiler. Genellikle dairesel kesitli çubuklar tercih edilir çünkü bu kesit şekli, eşit yük dağılımı sağlar ve çubuğun aksel yükleri daha etkili bir şekilde taşımasını sağlar. Ancak, farklı tasarım gereksinimleri doğrultusunda T, I, L, U ve kare gibi farklı kesit şekilleri de kullanılabilir. T şeklindeki kesitler, büyük momentlerin taşınması gereken durumlarda tercih edilebilir. I kesitler, yüksek dayanıklılık ve taşıma kapasitesi gerektiren uygulamalarda kullanılabilir. L ve U kesitler, çeşitli yapısal düzenlemeler için esneklik sağlar. Kare kesitler ise basit tasarımlar için tercih edilebilir ve eşit yük dağılımı sağlar. Çubukların malzemesi ve kesit şekli, yapısal mühendislik tasarımında önemli bir rol oynar ve uygun seçimler, yapısal dayanıklılığı artırabilir, maliyetleri düşürebilir ve tasarım esnekliğini artırabilir. Bu nedenle, çubukların malzemesi ve kesit şekli, belirli bir uygulamanın gereksinimlerine ve koşullarına göre dikkatlice seçilmelidir.
2. Düğüm noktaları: Uzay kafes sistemlerindeki çubuk elemanlarını birleştiren ve sistemin stabil bir yapı oluşturmasını sağlayan önemli parçalardır. Bu noktalar, çubukları doğru konumda tutarak sistemdeki yüklerin etkili bir şekilde dağılmasını sağlar. Düğüm noktaları, çubuk tipine, boyutuna ve üzerlerine gelecek yük miktarına göre farklı şekil ve ölçülerde imal edilebilir. Her bir düğüm noktası,

taşınması gereken yükleri karşılayabilecek kadar dayanıklı olmalıdır. Ayrıca, çubukların birleştirilmesi sırasında oluşabilecek hareketleri sınırlayarak sistemde istenmeyen deformasyonların meydana gelmesini engeller. Düğüm noktalarının tasarımı, mühendislik hesaplamaları ve deneyim gerektirir. Çünkü her bir düğüm noktasının, üzerindeki yükleri güvenle taşıyabilmesi için doğru boyutlara, malzemelere ve geometriye sahip olması gerekir. Ayrıca, düğüm noktalarının montajı ve bağlantıları da yapısal bütünlüğü sağlamak için titizlikle yapılmalıdır.

3. Mesnetler: Uzay kafes sistemlerinde önemli bir rol oynayan yapısal elemanlardır. Bunlar, ana taşıyıcı elemanlarla bağlantı kurarak sistemin yüklerini taşıyan ve güvenli bir şekilde aktaran bileşenlerdir. Uzay kafes sistemlerinde mesnetler, sistemin dayanıklılığını ve stabilitesini sağlamak için kritik öneme sahiptir. Mesnetler, genellikle doğrudan zemine veya diğer taşıyıcı elemanlara bağlanarak farklı yapısal konfigürasyonlar sağlayabilir. Mesnetlerin yerleştirilmesi ve bağlantı noktalarının belirlenmesi, yapısal mühendislik hesaplamaları ve detaylı tasarım gerektirir. Bu süreçte, mesnetlerin üzerine binen yükler, mesnetlerin taşıma kapasitesi, bağlantıların sağlamlığı ve mesnetlerin yerleştirilme konumları gibi faktörler dikkate alınmalıdır.
4. Temeller: Sistemin zemine oturan bölümüdür ve sistemdeki tüm yükü mesnet aracılığıyla zemine aktarır. Temel boyutu, kafes sisteminin tipine ve aldığı yüke göre farklı şekil ve boyutlarda tasarlanabilir. Sistem doğrudan zemin üzerine oturacaksa, mesnetler zemin üzerine ankraj edilerek bağlanır.
5. Örtü gereçleri: Sistemi üstten kaplayan ve koruyan elemanlardır. Bu gereçler, çeşitli malzemelerden yapılmış olabilir ve farklı şekil ve özelliklere sahip olabilirler. Örtü gereçleri, yapıyı hava koşullarından korurken aynı zamanda estetik bir görünüm sağlar. Hafif olmaları genellikle tercih edilir çünkü bu, yapıya ek yük getirmez. Ayrıca, hava koşullarına dayanıklı olmaları, uzun ömürlü ve dayanıklı bir yapı için önemlidir. Örtü gereçleri ayrıca, ısı ve ses yalıtımı sağlamak için uygun özelliklere sahip olabilirler. Bu sayede iç mekân konforu artırılır ve yapı daha kullanışlı hale gelir.
6. Yardımcı elemanlar: Uzay sistemleri, tasarım ve kullanım ihtiyaçlarına göre çeşitli ek elemanların kullanılmasını gerektirebilir. Bu yardımcı elemanlar, yapısal bütünlüğü sağlamak, işlevselliği artırmak veya belirli bir amaca hizmet etmek için kullanılır. Havalandırma sistemleri, yangın koruma sistemleri, ses sistemleri, aydınlatma ve elektrik kanalları gibi yardımcı elemanlar, yapıya ek fonksiyonlar ekleyebilir ve yapıyı daha işlevsel hale getirebilir. Bu elemanların tasarımı ve uygulanması, yapı mühendisliği prensipleri ve yerel düzenlemelere uygun olarak yapılmalıdır.

Bu bileşenler, kubbe formundaki uzay kafes sistemlerinin başarılı bir şekilde tasarlanması ve uygulanmasında önemli bir rol oynar. Her bir bileşen, sistemin güvenli ve

dayanıklı olmasını sağlar ve işlevselliğini destekler. Uzay kafes sistemlerinde kullanılan başlıca elemanlar Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1 - Çelik uzay kafes bileşenleri [9]

Kubbe Formundaki Örtü Sistemlerinin Yapısal Davranışı

Bu sistemlerin yapısal davranışı, hem yapısal malzemeye hem de kubbenin geometrisine bağlı olarak değişir. Yapısal davranışlar, sistem tasarımı ve kullanılan malzemeye göre değerlendirilmelidir. Kubbe formundaki örtü sistemlerinin yapısal davranışını anlamak için farklı malzeme ve sistemlerin incelenmesi gerekmektedir. Bu örtü sistemlerinin yapısal davranışını temsil eden 7 farklı grup:

1. Yığma kubbeler: Taş ve tuğla gibi kâgir malzemelerin kullanıldığı kubbelerdir. Bu tip kubbelerde basınca karşı direnç yüksektir, ancak çekme kuvvetleri statik açıdan sorun oluşturabilir. Yanal dikme payandaları, yarım kubbeler veya uçan payandalar gibi yapısal düzenlemelerle çekme kuvvetleri kontrol edilebilir.
2. Kabuk kubbeler: Betonarme malzemeden yapılan kubbelerdir. Yük dağılımı yığma kubbelerde olduğu gibi üst bölgede basınç ve alt bölgede çekme gerilmeleri oluşur. Alt bölgedeki çekme gerilmeleri çelik donatılarla desteklenir.
3. Kemer taşıyıcılı kubbeler: Bu kubbelerde merkezde birleşen basınç çemberi bulunmaz. Kubbe kemerleri birbirine paralel olarak tasarlanır. Örneğin, Oita Stadyumu en büyük açıklığa sahip kemer taşıyıcılı kubbeye örnek verilebilir.
4. Kaburgalı kubbeler: Kaburga ve kaburga dilimlerinden oluşan kubbelerdir. Kaburgalar aracılığıyla yükler çemberin eteğinden aktarılır. Floransa Katedrali gibi birçok tarihi yapıda kaburgalı kubbeler kullanılmıştır. Bu kubbeler yüksek mukavemet gerektiren alanlarda tercih edilebilir ve mimari açıdan çeşitli tasarım olanakları sunar.
5. Çubuk ağı kubbeler: Kubbe yüzeyini çubuk ağları ve düğüm noktaları ile farklı geometrik formlara ayırarak oluşturulan kubbelerdir. Nervürlü, schwedler, lamella, jeodezik, üç doğrultulu sistemler bu kubbelerin örnekleridir. Gerilmeler çubuk ağları üzerinden zemine eşit bir şekilde dağıtılır.
6. Kablo sistemli kubbeler: Çekme gerilmesine direnç gösteren çelik kablolarla desteklenen sistemlerdir. Kablolar, kubbe üzerinden aldığı yükü düşey taşıyıcı sistemlere aktarır. Bu şekilde kubbe sistemleri çelik kablolarla desteklenir.

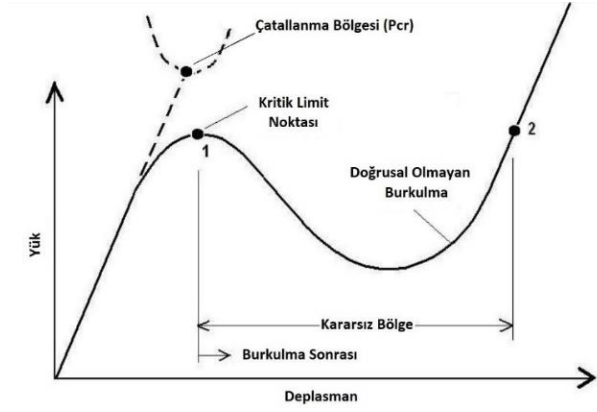
7. Pnömatik kubbeler: Basıncı hava ile gerilmeye sahip membran yüzeyi kullanılarak ayakta tutulan sistemlerdir. Bu sistemlerde membran sadece çekme gerilmesine direnç gösterir. Hava basıncıyla desteklenen kubbeler, kablolar yardımıyla üst yüzeydeki membranın stabilitesini sağlar.

Bu 7 farklı grup, kubbe şeklindeki örtü sistemlerinin yapısal davranışını temsil eder ve malzemeye, geometriye ve sistem tasarımına bağlı olarak farklı davranışlar sergiler. Kubbenin yapısal davranışının anlaşılması, doğru tasarım ve güvenli bir uygulama için önemlidir.

Çelik Kubbe Sistemlerinin Stabilitesi

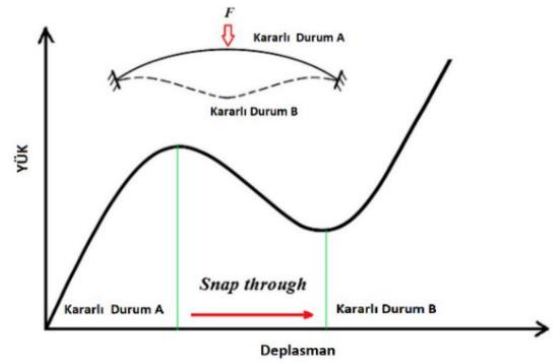
Çelik kubbe sistemlerinde stabilite, tasarım aşamasında önemli bir konudur. Özellikle burkulma davranışı, kafesli yapıların göçme güvenliği için kritik bir faktördür. Burkulma genellikle çubuk veya bağlantı elemanlarının doğrusal olmaması nedeniyle aşırı yüklemeler sonucunda ortaya çıkan bir kararsızlık durumudur. Bu durum, düzlem içi basınç kuvvetinin etkisiyle oluşur ve genellikle malzemenin mukavemetinden ziyade yetersiz stabilite nedeniyle ortaya çıkar. Bu nedenle, sistem yük altında statik olarak sağlam olsa bile burkulma analizi yapılmalı ve gerektiğinde eleman veya kafes stabilitesi artırılmalıdır. Genellikle kafes yüksekliği veya malzeme atalet momentini artırmak için tasarımlar yapılarak burkulma önlenmeye çalışılır. Özellikle kafes sistemlerinde bir elemandaki burkulma davranışı, bölgesel hatta öngörülemez sistemsel göçmelere neden olabilir. Bu nedenle, eleman burkulmasının sistemsel mukavemet üzerinde büyük bir etkisi olduğu söylenebilir.

Şekil 2'deki grafikte burkulma davranışı incelendiğinde, doğrusal olmayan ve çatallanma burkulması olarak adlandırılan bir davranış gösterir. Bu davranış grafiğinde elastik davranıştan sonra kritik limit noktasına ulaşıldığında ani bir şekil değiştirme gerçekleşir. Çatallaşma bölgesinde eleman zayıf bölgesine doğru şekil değiştirir. Bu noktada kararsız hale gelen yapı elemanı, deplasman yönüne doğru doğrusal olmayan bir burkulma eğrisini takip eder. Bu şekil değişimi hızlı ve ani bir şekilde gerçekleşebilir. Yüzey eğriliği olan kubbe ve tonoz gibi yapı sistemlerinde, örtü sistemi tersine burkulup dönerek yapısını tamamen kaybedebilir. Bu nedenle, kubbe ve tonoz yapılarının yükseklik/açıklık oranının burkulmadan en az etkilenmesi için mümkün olduğunca yüksek seçilmesi tercih edilir.



Şekil 2 - Nonlineer ve çatallanma burkulma davranışı grafiği [18]

Kubbe sisteminin yapısal olarak burkulma davranışı incelendiğinde, elemanın kararsız hale geldiği bir davranış sergiler. Şekil 3'te gösterilen kararlı A noktasından kararsız B noktasına kadar kritik bölgede sistem kararsızdır. Bu bölgeye kadar enerji depolayan ve kritik yük sonrası gerinin enerjisi serbest bırakan sistemde, eleman burkulup dönme gerçekleştirir ve bu şekil değişimi hızlı ve ani bir şekilde gerçekleşir.



Şekil 3 - Tersine dönerek burkulma davranışında yük-deplasman grafiği [19]

Çelik kafes sistemlerinde oluşan burkulma davranışında düğüm noktalarının serbestlik dereceleri büyük ölçüde etkilidir. Düğüm noktalarında yeterli rijitlik sağlanmadığı ve elemanların aksenal gerilme dışındaki moment ve kesme kuvvetlerine uygun tasarlanmadığı durumlarda eleman burkulma davranışı gösterebilir.

Sistem üzerindeki burkulma kararsızlıkları tasarım aşamasında mutlaka kontrol edilmelidir. Burkulma analizi, lineer ve doğrusal olmayan olmak üzere iki ayrı şekilde yapılabilir. Lineer burkulma analizi, elastik yapıda burkulmanın teorik dayanımını ve çatallaşma noktasını belirler. Doğrusal olmayan burkulma analizi ise elemanın en kararsız hale geldiği noktayı bulur ve gerçeğe en yakın kritik yükü tahmin etmek için kademeli yük artışı sağlar. Burkulma sonrası stabilite kaybı ve sistem stabilitesi gibi faktörler, doğrusal olmayan burkulma analiziyle belirlenebilir.

Kubbe sistemlerinde eleman burkulması, tek bir elemanın etkilendiği burkulma davranışını ifade eder. Bu durum, tek bir elemandan kaynaklanarak yapıdaki geniş

bir alana yayılabilir. Yapının geometrisini etkileyebilir ve bölgesel veya bütünden burkulma kararsızlığını oluşturabilir. Bu hassas kararsızlık nedeniyle, burkulma boyunun azaltılması veya atalet momentinin artırılmasıyla kritik yüke maruz kalan eleman üzerindeki burkulma davranışı önemli ölçüde azaltılabilir. Ancak, tek bir elemandan yapıya etkileyen burkulma kararsızlığının tasarım ve kesit dışındaki diğer faktörleri de dikkate almak önemlidir. Özellikle birleşim elemanlarının eksantrik yük iletimine neden olan kusurları, burkulma davranışını etkileyebilir. Bu nedenle, doğru bir uygulama için özenli bir şekilde yapılması gerekmektedir. Eleman burkulması için Euler Burkulma teorisi kullanılarak kritik yük tespit edilebilir. Euler Burkulma teorisi, elastisite modülü, etkili uzunluk, burkulma boyu katsayısı ve atalet momenti gibi faktörleri dikkate alarak kritik yükü hesaplar.

Kubbe sistemlerinde yerel burkulma davranışı da sıkça görülebilir. Özellikle tek katmanlı kubbe sistemlerinde daha yaygın olan bu davranış, düğüm noktalarından kaynaklanır ve sınırlı bir alana etkier. Kubbe düğümlerinde bulunan içten asılı aydınlatma ve havalandırma gibi elemanlar, yerel burkulma davranışına neden olabilir. Bu elemanların kubbe düğümlerinde yarattığı yoğun tekil yük, burkulma davranışını tetikleyebilir. Yerel burkulma davranışı ayrıca, tersine dönerek burkulma (snap-through) olarak da ortaya çıkabilir. Bu durum, bölgesel veya sistemin tamamının tersine dönerek burkulması şeklinde gerçekleşebilir. Tersine dönerek burkulma, sistem stabilitesini etkileyebilir ve farklı gerilmelerin oluşmasına neden olabilir. Bu nedenle, yapısal tasarım ve analiz sürecinde yerel burkulma davranışının öngörülmesi ve önlenmesi önemlidir.

Global burkulma davranışı ise bir yapının toptan göçmesine neden olabilen ciddi bir kararsızlık durumudur. Özellikle çift eğrilikli sistemlerde, tek eğrilikli sistemlere göre daha fazla global kararsızlık görülür. Bu tür sistemlerin yük taşıma kapasiteleri daha yüksek olmasına rağmen, yapısal simetri bozulduğunda global burkulma davranışı artar. Simetrik yük dağılımları, birikmiş kar yükleri ve rüzgar dış basınçları gibi dış etkenler, bu davranışın ortaya çıkmasında önemli rol oynar. Yük dağılımı gibi dış etkenlerin yanı sıra, yapısal hatalar ve eksiklikler de global burkulma davranışını etkileyebilir. Örneğin, hatalı kaynaklar veya eğimli çelik elemanlar, yapısal simetri bozukluklarına neden olarak global burkulma davranışını artırabilir. Bu nedenle, yapısal tasarım ve analiz sürecinde simetri ve diğer yapısal gerekliliklerin dikkatle ele alınması ve uygulanması önem taşır.

Sonuç olarak, çelik kubbe sistemlerinde stabilize ve burkulma davranışı dikkate alınması gereken önemli konulardır. Tasarım aşamasında burkulma analizi yapılmalı ve eleman veya kafes stabilitesi artırılmalıdır. Eleman burkulması, yerel burkulma ve global burkulma gibi farklı tiplerde ortaya çıkabilir ve yapısal simetri, doğrusallık ve kesit tasarımları gibi faktörler tarafından etkilenebilir. Doğru tasarım ve analiz süreci ile burkulma

davranışının kontrol altına alınması ve yapısal stabilitenin sağlanması önemlidir.

Kubbe Formundaki Uzak Kafes Tasarım ve Analizi

Makale çalışması kapsamında çift katmanlı bir model olmak üzere uzak kafes sistemi modellenmiştir. Uzak kafes sistemlerinin ticari veya akademik çalışmalarda analizleri için çeşitli bilgisayar yazılımları kullanılmaktadır. Bu yazılımlar, hesaplama yöntemlerini ilgili yönetmeliklere göre ayarlayabilmektedir. Genellikle bu yazılımlar sonlu eleman yöntemini kullanarak yapısal analizleri gerçekleştirmektedir. Her kuruluş kendi yapısal analizleri için farklı bilgisayar yazılımlarını tercih edebilmektedir. Uzak kafes sistemlerinin analizlerinde en sık tercih edilen yazılımlardan biri SAP2000 programıdır. Makale kapsamında incelenen sistem modelinin analiz ve tasarımında SAP2000 programı kullanılmıştır. Bu program, üç boyutlu doğrusal olmayan statik ve dinamik analizlerin yanı sıra yapısal elemanların tasarım kolaylığını da sağlamaktadır. Ayrıca, çeşitli ülkelerin standartlarına uygun olarak çözümler üretebilmektedir.

Tasarım aşamasında Türk standartlarına göre tasarım yapılmıştır. Çelik yapıların tasarım ve hesaplama ilkeleri, Yük Ve Dayanım Katsayıları İle Tasarım (YDKT) veya Güvenlik Katsayıları İle Tasarım (GKT) prensipleri üzerine yapılabilmektedir. YDKT prensibine göre, çelik yapıların taşıma kapasiteleri yük ve dayanım katsayılarına göre tasarlanırken, GKT prensibinde ise güvenlik gerilmelerine göre tasarım yapılır. Makale kapsamında çelik kubbe tasarımında YDKT yöntemi tercih edilmiştir.

Yük kombinasyonlarında kullanılan karakteristik yükler şunlardır:

G: Sabit Yük

Q: Hareketli Yük

S: Kar Yüğü

W: Rüzgar Yüğü

E: Deprem Etkisi

YDKT prensibine göre, tasarım katsayısı ile çarpılmış tasarım dayanımı, öngörülen yük veya yük kombinasyonlarına göre hesaplanan karakteristik dayanım değerine eşit veya daha büyük olmalıdır. Bu prensip $R_U \leq \Phi R_n$ şeklinde ifade edilir. Burada R_U , YDKT kombinasyonları altında hesaplanan dayanımı; R_n , karakteristik dayanımı; Φ ise tasarım dayanımı katsayısını temsil eder.

Tasarım katsayısı ile çarpılmış tasarım dayanımı, Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik'te (ÇYTHYEDY) verilen YDKT yük kombinasyonları ile belirlenir. Bu yük bileşimlerinde belirtilen yük kombinasyonları, farklı sistem kombinasyonlarına ve yapısal etkilere göre tasarım dayanımını belirlemektedir.

Taşıyıcı elemanların deplasman kontrolü için ÇYTHYEDY'te belirtilen kullanılabilir sınır durumu için

verilen yük kombinasyonları altında çatı sistemlerinin düşey yer değiştirmeleri hesaplanmalıdır. Bu kombinasyonlar, yapısal kullanılabilirlik sınır durumlarını kontrol etmek için kullanılır. Yatay yer değiştirme durumunda ise kaplamaların olumsuz etkilenmemesi için kaplama malzemesi sehim durumuna bağlı olarak değerlendirilmelidir.

Sonuç olarak, Makale kapsamında çift katmanlı kubbe şeklinde uzay kafes sistemi tasarlanmış ve analizi yapılmıştır. Tasarım aşamasında Türk standartlarına göre tasarım prensipleri ve YDKT yöntemi kullanılmıştır. Yük kombinasyonları ve tasarım dayanımı katsayıları, ÇYTHYEDY'de belirtilen tablolara göre belirlenmiştir. Analiz ve tasarım sürecinde SAP2000 programı tercih edilmiştir. Bu şekilde, kubbe şeklindeki uzay kafes sistemlerinin güvenli ve stabil bir şekilde tasarlanması ve analiz edilmesi sağlanmıştır.

Çift Katmanlı Kubbe Modeli Analizi

Çift katmanlı çelik kubbeler, iki ayrı kubbe katmanının birleştirilmesiyle oluşan yapılar olarak tanımlanabilir. Bu yapıların analizi, kubbenin boyutları, geometrisi, malzeme özellikleri ve yükleme koşulları gibi girdi parametrelerinin belirlenmesiyle başlar. İki katman arasındaki mesafe, malzeme kalınlığı ve çelik malzemenin özellikleri gibi faktörler, yapısal davranışı etkileyen önemli parametrelerdir.

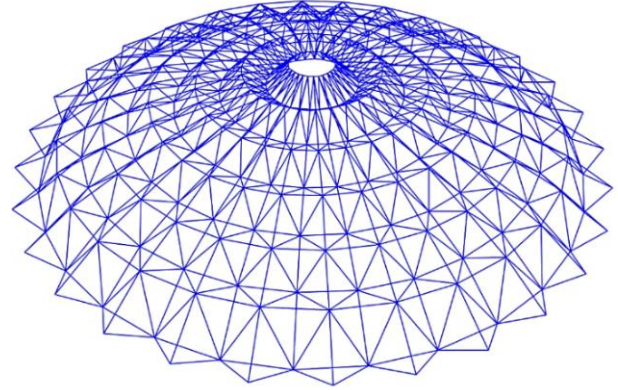
Çift katmanlı kubbelerin gerilme ve deformasyon analizi, her iki katmanın yük altında nasıl davrandığını, her iki katmanda oluşan gerilmeleri ve şekil değişimlerini hesaplar. Bu analizde her iki katmanın etkileşimi de dikkate alınır. Çift katmanlı kubbelerin yapısal davranışı, tek katmanlı kubbelerden daha karmaşıktır, ancak aynı zamanda daha yüksek dayanıklılığa ve rijitliğe sahiptirler. İki katmanın birleştirilmesi, yapısal yükün daha iyi dağılmasını sağlar ve yapıya daha fazla stabilite kazandırır.

Bu analizde çift katmanlı kubbe incelenmiştir. Model kubbe, 26 metre açıklığa, 4 metre yüksekliğe, 2 metre çapında bir basınç halkasına ve 24 metre çapında bir çekme halkasına sahiptir. Kubbe, 30 özdeş meridyen kafes sisteminden ve 7 paralel halkadan oluşmaktadır. Analiz için Diyarbakır ilindeki Dicle Üniversitesi arazisi seçilmiştir. Model kubbe elemanlarında S355 sınıfı çelik kullanılmıştır. Bu çelik sınıfının akma gerilmesi 355 MPa'dır. Kubbe elemanları boru profil elemanlarından oluşmaktadır ve çekme ve basınç etkilerine maruz kalmaktadır. Boru profillerin birleşim bölgeleri mafsallı olarak düzenlenmiştir.

Kubbenin kaplaması için lamine cam tercih edilmiştir. Cam, geniş alanları örtecek olan kubbelerin aydınlatılmasında gün ışığından faydalanmayı sağlamak için kullanılmıştır. Kubbe sisteminin yüzeyi yansıtıcı özellikli malzemelerle kaplanarak güneş ışınlarının ışınlama yolu ile neden olduğu yüksek ısıyı engellenmiştir.

Yüklemelerde kubbenin kendi ağırlığı, kar yükü, rüzgar yükü, düzgün sıcaklık farkı etkisi ve deprem etkisi dikkate alınmıştır. Kubbenin analizi, bu yüklemelerin

etkilerini hesaplamayı içermektedir. Deprem etkisi, yapıyı dikey ve yatay yönde etkileyen bir yüklemidir. Bu bilgiler ışığında Model çift katmanlı kubbenin analizi yapılmış ve yapının davranışı incelenmiştir.

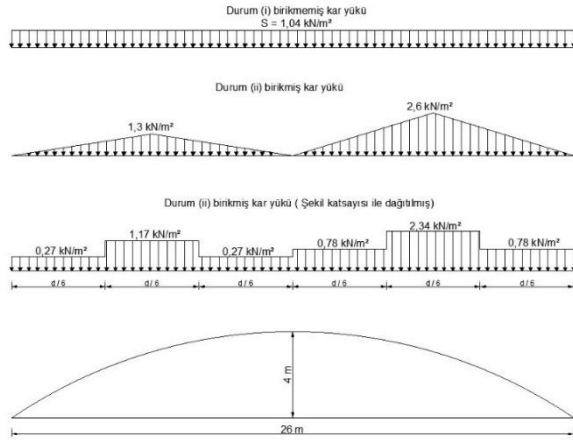


Şekil 4 - Çift katmanlı uzay kafes kubbe sisteminin perspektif görünümü [17]

Model Hesap Metodunda Kullanılan Yükler

Model için; sabit, hareketli, kar, rüzgâr, deprem yükü ve düzgün sıcaklık farkı etkisi sayısal olarak hesaplanıp SAP2000 programına ataması yapıldı.

1. Sabit ve Hareketli Yükler: Sabit yükler, kubbe şeklindeki kafesin profilleri, kaplama elemanları ve tesisat elemanları gibi yapıya etki eden sabit karakteristik yüklerdir. Bu yükler, yer çekimi ivmesi yönünde kubbeye etki eder. Cam kaplama yükünün hesaplanması için cam kalınlığına göre kütle yükü hesaplanır. Lamine camın birim hacim ağırlığı ve kalınlığına göre cam yükü hesaplanır. Ayrıca ek servis yükü de tanımlanır. Çelik kafes profil dışında sisteme etkitilecek sabit yük $0,5 \text{ kN/m}^2$ olarak hesaplanır. Bu yüklerin toplamı, sistem hesaplamasında kullanılan toplam sabit yükü oluşturur.
2. Kar Yükü: Kar yükü, yapı hesaplamalarında TS 498 standartına göre hesaplanır. Hesaplama sürecinde yapıya etki eden coğrafi konum ve rakım değerleri dikkate alınır. Kar birikimi, yapı üzerinde asimetrik ve simetrik dağılımlar şeklinde olabilir, bu dağılımlar kar yükü hesaplamasında önemli bir rol oynar. Kar yükü hesaplaması için öncelikle kar yükü şekil katsayıları belirlenir. Bu katsayılar, kar birikiminin asimetrisi ve kubbe şekline bağlı olarak farklılık gösterebilir. Şekil katsayıları, kar yükünün dağılımını ve etkisini açıklamak için kullanılır. Kar yükü, iki farklı tipte yük kombinasyonuna etki eder. Bunlar birikmemiş tam kar yükü ve birikmiş yarım kar yüküdür. Bu yükler, kar birikiminin durumuna bağlı olarak farklı şekillerde etki gösterir. Kar yükünün kubbe modeline etkisi, yük dağılımı Şekil 5'de gösterilmiştir. Bu şekilde, kar yükünün nasıl dağıldığı ve yapı üzerinde hangi bölgelerde yoğunlaştığı açıklanır. Bu bilgiler, yapı hesaplamalarında kar yükünün etkisini doğru bir şekilde değerlendirmek için önemlidir.

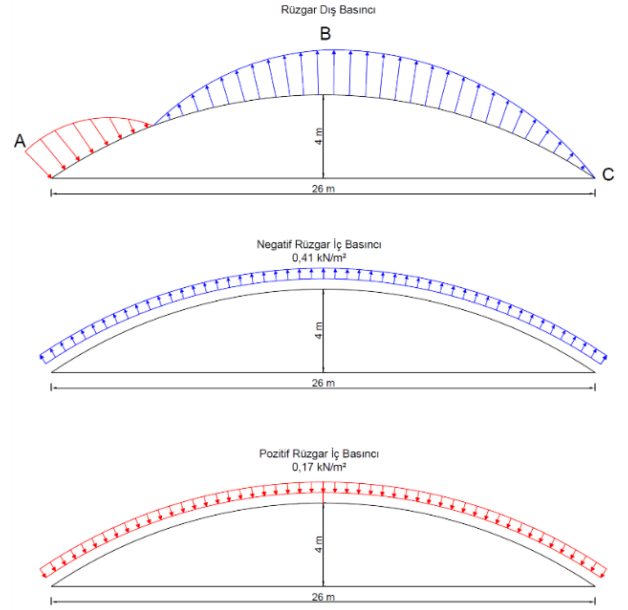


Şekil 5 - Kubbe sistemine uygulanan birikmiş ve birikmemiş kar yük dağılımı [17]

3. Rüzgâr Yükü: Rüzgâr yükü, yapısal tasarım hesaplamalarında önemli bir karakteristik yüküdür. Hesaplamalar, ortalama rüzgâr hızı ve diğer değişkenler temel alınarak yapılır. Bu hesaplamalarda engebelik katsayısı, orografi katsayısı ve diğer parametreler dikkate alınır. Rüzgâr yükü, dış ve iç basınç kuvvetleri olarak tanımlanır. Dış basınç kuvveti, rüzgârın yapının dış yüzeyinde oluşturduğu basınç ve emme kuvvetlerini içerir. İç basınç kuvveti ise rüzgârın kapalı olmayan yapıların içine girmesiyle oluşan basınç etkisini ifade eder.

Rüzgâr yükü hesaplamalarında kubbenin geometrik formuna bağlı olarak basınç katsayısı belirlenir. Bu basınç katsayısı, yapının ön, tepe ve arka noktalarında basınç farkının kubbe şeklinden kaynaklanan değişimini gösterir. Belirlenen basınç katsayısıyla birlikte bölgesel rüzgâr dış basıncı hesaplanır. Rüzgâr yükü hesaplamalarında, çift eğrilikli küresel sistemler gibi karmaşık yapılar söz konusu olduğunda, hesaplama süreci daha da karmaşık hale gelir. Bu nedenle, rüzgâr dağılımı hesaplamalarında önceden belirlenmiş formüller kullanılmalı veya rüzgâr tüneli testleri yapılmalıdır. Literatürde, kubbe formundaki sistemlere etkileyen rüzgâr yüklerini hesaplamak için rüzgâr tüneli testlerine dayanan çeşitli yöntemler ve öneriler bulunmaktadır.

Rüzgâr tüneli testleriyle gerçek gerilmelerin yakalanması zor olabilir, çünkü prototip yapı ile rüzgâr tüneline oluşan rüzgâr profili ve türbülans değerleri arasındaki ilişki karmaşık olabilir. Ayrıca, akışkan viskozitesinden kaynaklanan sınır tabakası uyumu, kubbe yüzeyinde emme ve basınç katsayılarını etkileyebilir. Rüzgâr yükleri, yapıya dışarıdan etki eder ve tamamen kapalı yapılar için dış basınç kuvveti oluştururken, kapalı olmayan yapılar için iç basınç kuvveti oluşturur. Rüzgâr yükünün kubbe modeline etkisi, yük dağılımı Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6 - Kubbe sistemine uygulanan iç ve dış rüzgâr yükü [17]

4. Deprem Yükü: Uzak kafes sistemleri diğer yapı sistemlerine göre daha hafif olduğu için deprem yükü etkisi altında daha az kalmaktadır. Bu nedenle, Dicle Üniversitesi arazisi için uzak kafes sistemi tercih edilmiştir. Deprem yükünün hesaplanmasında Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY-2018) dikkate alınmıştır. Yerel zemin sınıfı "ZB" olarak kabul edilmiştir. Spektral ivme katsayıları, AFAD'ın interaktif web haritası üzerinden elde edilmiştir. Tasarım spektral ivme katsayıları hesaplanarak kullanılmıştır. Yatay elastik tasarım spektrumu ve düşey elastik tasarım spektrumu grafikleri kullanılarak yerçekimi ivmeleri hesaplanmıştır. Bina kullanım sınıfı, deprem tasarım sınıfı ve yapı yüksekliği sınıfı belirlenmiştir.
5. Düzgün Sıcaklık Farkı Etkisi: Uzak kafes sistemlerinde çelik elemanların sıcaklık değişimlerine bağlı olarak ortaya çıkan genleşme ve büzülme nedeniyle oluşan gerilmelerdir. Bu gerilmeler, çubuk ve düğüm noktalarında farklı ve ek bir yük oluşturur. Sıcaklık değişimi $\pm 20^\circ\text{C}$ olarak ele alınmıştır. Bu, elemanların sıcaklık artışı ve azalışı için kullanılan tipik bir değerdir. Sıcaklık etkisi, yapıya karakteristik bir yük olarak tanımlanır ve kombinasyonlara dahil edilmemiştir. Bunun nedeni, sıcaklık etkisinin sistemi kritik düzeyde etkilememesidir. Sıcaklık etkileri, elemanlara tatbik edilen yükleme şekliyle modellenir. Örneğin, çelik elemanların genleşmesi ve büzülmesi nedeniyle ortaya çıkan aksel gerilmeler hesaba katılır. Sıcaklık etkisinin karakteristik olarak incelenmesi, sistem davranışı hakkında bilgi sağlamak amacıyla yapılır. Bu sayede elemanların sıcaklık değişimlerine nasıl tepki vereceği anlaşılabilir. Özetle, sıcaklık etkileri, uzak kafes sistemlerinde çelik elemanların sıcaklık değişimlerine bağlı olarak ortaya çıkan gerilmeleri ifade eder. Bu gerilmeler,

elemanlara ek bir yük olarak tanımlanır ve sistemin davranışı üzerindeki etkileri incelenir. Ancak, sıcaklık etkisi bu model için diğer yüklerle karşılaştırıldığında daha az önem taşır.

Analiz Sonuçları

Kubbe Formundaki Elemanların Eksenel Gerilme Değerleri

Model'in SAP2000 programı kullanılarak analizi ve tasarımı yapılmıştır. Yapının elemanlarının tasarımında AISC 360-10 yönetmeliğine uygun olarak YDKT yük bileşimine büyük oranda benzeyen LRFD yük birleşimi kullanılmıştır. Moment ve eksenel yük diyagramları, Model'in çift katmanlı ve çubuk birleşim elemanlarından oluştuğu ve mafsallı olduğu için sadece eksenel gerilmelere maruz kaldığı göz önünde bulundurularak elde edilmiştir. Bu elemanların birleşim bölgelerinde moment değeri sıfır olduğundan, analiz sonuçları eksenel yük gerilmelerine odaklanmaktadır. Ayrıca, iç ve dış katmanlar arasında farklı gerilme değerleri ve davranışları olduğu için bu durum da dikkate alınmıştır. Aşağıda, bazı örnekler için elde edilen karakteristik yük kaynaklı eksenel yük gerilmeleri verilmiştir.

Şekil 7(a)'da verilen sabit yük (G) altında eksenel yük diyagramı: Çubukların öz ağırlığı, kaplama ve ek servis yükleri sonucunda oluşan ağırlığın neden olduğu eksenel yük diyagramı incelenmiştir. İç katmanda sadece basınç gerilmesi oluşmuş olup en büyük basınç gerilmesi 14,87 kN ve en küçük basınç gerilmesi 1,67 kN olarak hesaplanmıştır. Dış katmanda ise çekme ve basınç gerilmeleri oluşmuştur. Etek bölgesinde en büyük çekme gerilmesi 1,84 kN ve basınç bölgelerinde ise en yüksek basınç gerilmesi 8,86 kN'dır.

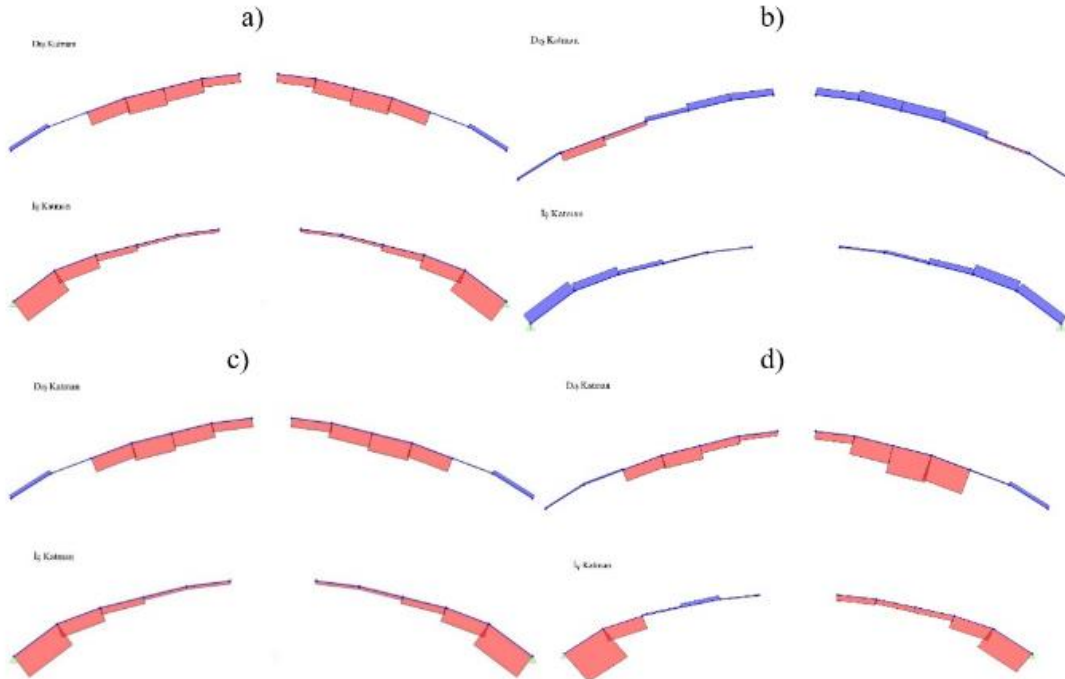
Şekil 7(b)'de verilen dış rüzgâr yükü (W_{EX}) altında eksenel yük diyagramı: Dış rüzgâr etkisi kubbe sistemlerinde basınç ve vakum etkileri oluşturur. Dış rüzgâr yükünün çubuklarda oluşturduğu eksenel yük diyagramında, en büyük basınç gerilmesi sol kirişte 4 kN olarak hesaplanmıştır. En büyük çekme gerilmesi ise sağ kirişte 4,7 kN'dır. İç katmanda ise tüm çubuklar çekme gerilmesine maruz kalmakta ve en büyük çekme gerilmesi sol kirişte 7,58 kN'dır.

Eksenel yük diyagramında, tam kar yükü Şekil 7(c)'de gösterilmiştir. İç katmanda, sadece basınç gerilmeleri oluşur ve en büyük basınç gerilmesi 18,38 kN, en küçük basınç gerilmesi ise 1,55 kN'dır. Dış katmanda ise çekme ve basınç gerilmeleri bir arada meydana gelir; etek bölgesindeki çekme gerilmesi 2,87 kN değerindedir, basınç bölgelerinde ise en yüksek basınç gerilmesi 10,73 kN'dır.

Şekil 7 (d)'da verilen sağ kar yükü altında eksenel yük diyagramı: Yarım kar yükü, tam kar yükü dışında sağ ve sol yarım kar yükü olarak dikkate alınır. Sağ yarım kar yükü durumunda, dış katmanda sağ kirişlerde sol kirişlere göre daha yüksek basınç ve çekme gerilmeleri oluşur. En büyük basınç gerilmesi sağ kirişte 17,95 kN ve en büyük çekme gerilmesi sağ kirişte 2,16 kN'dır. İç katmanda ise en büyük basınç gerilmesi sol kirişte 26,05 kN olarak hesaplanmıştır. Sol kirişte sağ kirişten farklı olarak 2,73 kN çekme gerilmesi oluşmaktadır. Bu çekme gerilmesi, dengesiz kar yüklerinin kritik yükü aşması ve bölgesel burkulma veya daha fazlasıyla sonuçlanması durumunda tersine dönerek burkulmaya neden olabilir.

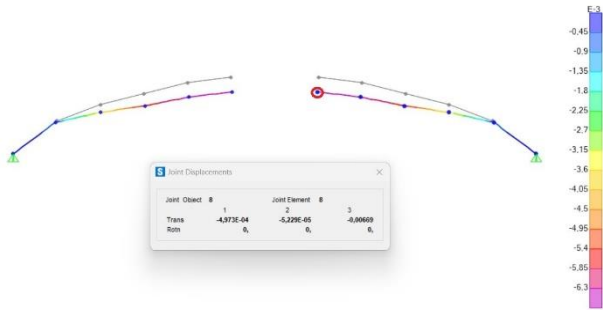
Kubbe Deplasman Sınır Kontrolü

Düşey yer değiştirme durumu: Yer değiştirmenin düşey ekseninde kontrolü için çeşitli kombinasyonlar kullanılarak maksimum yer değiştirme sınırı belirlenmiştir.



Şekil 7 - Karakteristik yükler; (a) sabit yük, (b) dış rüzgâr yükü, (c) tam kar yükü, (d) yarım kar yükü etkisi eksenel gerilme diyagramı [17]

ÇYTHYEEY madde 15.2'ye göre, düşey yer değiştirmenin açıklığa oranı 1/300 sınırını aşmamalıdır. Model'in en büyük düşey yer değiştirmesi G+Q kombinasyonunda 6,69 mm'dir, bu da sınır uzunluğu olan 86 mm değerini aşmadığını göstermektedir. Düşey yer değiştirme sınır durumu için deplasman durumu Şekil 8'de gösterildiği gibidir.



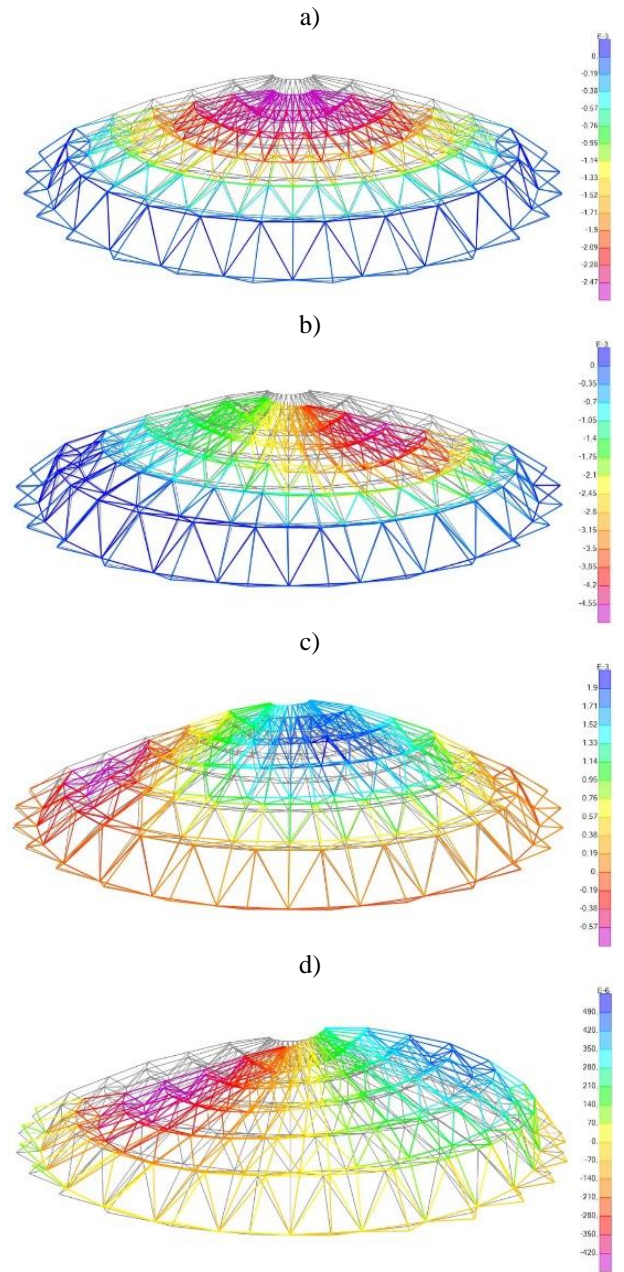
Şekil 8 – Düşey deplasman sınır kontrolü [17]

Yatay yer değiştirme durumu: Yer değiştirme kontrolü için çeşitli kombinasyonlar kullanılarak maksimum yer değiştirme sınırı belirlenmiştir. ÇYTHYEEY madde 15.3'e göre, sistemin cephe kaplaması ve türüne bağlı olarak yatay yer değiştirmenin belirli bir sınırı olmalıdır. Model'de yatay yer değiştirmeleri incelenmiş ve sınırlar içinde olduğu görülmüştür. Yatay yer değiştirme sınır durumu için deplasman durumu Şekil 9'da gösterildiği gibidir.



Şekil 9 – Yatay deplasman sınır kontrolü [17]

Karakteristik yükler altında yer değiştirme durumu: Çeşitli karakteristik yükler altında düğüm noktalarının düşey yer değiştirmeleri incelenmiştir. Deplasman, renk skalası kullanılarak düşey yer değiştirmeleri Şekil 10'da görselleştirilmiştir.



Şekil 10 - Karakteristik yükler; (a) Sabit yük, (b) yarım sağ kar yükü, (c) dış yatay rüzgar yükü, (d) deprem yükü etkisi altında deplasman durumu [17]

Sonuç olarak, Model'in düşey ve yatay yer değiştirmeleri, tasarım sınırlamalarını aşmayacak şekilde kontrol edilmiştir. Bu analiz sonuçları, yapısal hesaplamalar ve çelik elemanların boyutlandırılmasında kullanılmıştır.

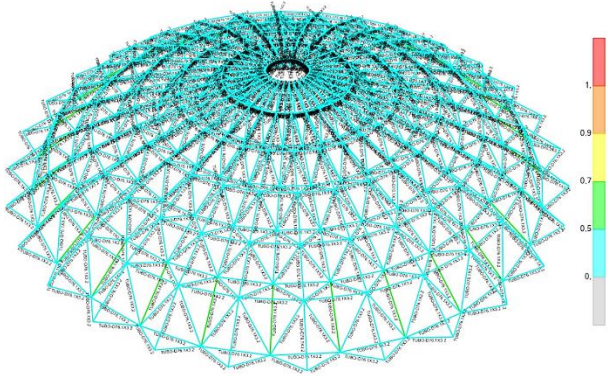
Kubbe Elemanların Tasarım Sonuçları

Model'in tasarımı, çift katmanlı kubbe sistemindeki çubuk elemanlar üzerindeki gerilme değerlerine göre yapılmıştır. Tasarım, SAP2000 programında yapılmış ve çubuk kesitleri belirlenmiştir. Tüm çubuklar aynı kesite sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Tasarımda burkulma davranışı da göz önünde bulundurularak kesit seçimi yapılmıştır.

Şekil 11'da çubuk elemanların "Etki/Kapasite" oranlarına göre renk skalası verilmiştir. Tasarım sonucunda en kritik yük kombinasyonu olan $1.2G+1.6Q+0.5S_{Yarım}$ yük kombinasyonu altında TUBO-D76,1x3,2 boru profili uygun kesit olarak belirlenmiştir. Her çubuk için aynı kesit kullanılarak imalat, nakliye ve montaj süreçlerinde kolaylık sağlanması ve hatalı işlemlerin önlenmesi amaçlanmıştır.

Ek A'da, sistemde en kritik çubuk olan kubbenin etek bölümündeki iç katman çubuğun tasarım detayları verilmiştir. Bu elemanın tasarımı, basınç etkisi altındaki eleman esaslarına göre belirlenmiştir. Tasarım detaylarına göre gerekli kesit ve boyutlar belirlenmiştir.

Örnek olarak, en kritik çekme yükü altında eleman tasarımı da incelenmiştir. Kubbe sisteminde $0.9G+1.6W_2$ yük kombinasyonu altında oluşan kritik çekme gerilmesi için program tarafından belirlenen tasarım detayları Ek B'de verilmiştir.



Şekil 11 – Çift katmanlı kubbe sisteminin tasarımı ve etki/kapasite oranına göre eleman renklendirilmesi [17]

Bu tasarım sonuçlarına göre, Model için uygun kesitler belirlenmiş ve tasarım detayları belirlenmiştir. Tasarımın yapısal gereksinimleri karşıladığı ve yapıya dayanıklılık sağladığı görülmektedir.

Bulgular ve Tartışma

Model'in kubbe geometrisi gereği, etek bölgelerinde çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Ayrıca, kubbenin çift katmanlı yapısı, alt ve üst tabakaların yükün çeşidine ve uygulama yerine bağlı olarak farklı gerilmelere maruz kalacağı anlamına gelmektedir. Özellikle düzgün yayılı olmayan yükler veya simetrik olmayan büyük tekil yükleme durumunda, iç ve dış katmanlar stabiliteyi korumak ve dengede kalmak için farklı şekillerde gerilmelere maruz kalmaktadır.

Çember kirişleri, simetrik yükler altında çekme gerilmelerine maruz kalırken, tepe noktasına doğru çekme gerilme değeri azalmakta ve basınç gerilmesi artmaktadır. En büyük basınç gerilmesi, çember kirişlerinde tepe noktasında meydana gelmektedir. Bununla birlikte, asimetrik yükler altında çubuk elemanları yük durumuna bağlı olarak bazen çekme bazen de basınç gerilmesine maruz kalabilmektedir. Bu nedenle, çubuk elemanlarının tasarımı sırasında hem

çekme hem de basınç gerilmelerini karşılayacak şekilde tasarımı yapılması gerekmektedir.

Radyal kirişler, simetrik yükler altında iç katmanda sadece basınç etkisine maruz kalırken, dış katmanda etek bölümünde çekme gerilmesi oluşur. Ancak tepe noktasına doğru ilerledikçe, basınç gerilmesi etkisi artarak devam eder. Bu durum, radyal kirişlerin yük durumuna bağlı olarak farklı gerilmelere maruz kaldığını gösterir. Asimetrik yüklemeler altında ise her bir radyal kiriş, çekme ve basınç gibi farklı gerilme durumlarına maruz kalabilir. Bu nedenle, radyal kirişlerin tasarımında her bir elemanın çekme ve basınç gerilmelerine uygun şekilde analiz edilmesi ve tasarlanması önemlidir. Yapının stabilitesi ve dayanıklılığı açısından, her bir radyal kirişin yük durumuna bağlı olarak çekme ve basınç gerilmelerine karşı uygun dayanım sağlaması gerekmektedir.

Tüm bu faktörler, Model'in kubbe geometrisi, çift katmanlı yapısı ve yük durumlarına bağlı olarak farklı gerilmelere maruz kalmasını göstermektedir. Bu bilgiler, yapısal analiz ve tasarımda önemli bir rol oynamaktadır ve Model'in stabilize, dayanıklılık ve yapısal gereksinimleri karşılamasını sağlamaktadır.

Sonuçlar

Çalışma kapsamında oluşturulan çift katmanlı model sisteminin analiz ve tasarımının gerçekleştirildiği ve yapısal gereksinimleri karşılanmıştır. Kubbenin geometrisi nedeniyle etek bölgelerinde çekme gerilmelerinin oluştuğunu ve çift katmanlı yapının iç ve dış katmanlarına bağlı olarak farklı gerilmelere maruz kaldığını ortaya koymaktadır. Radyal kirişler, simetrik yükler altında iç katmanda sadece basınç etkisiyle karşılaşırken, dış katmanda ise etek bölümünde çekme gerilmeleri oluşmakta ve tepe noktasına doğru basınç gerilmesi etkisi artmaktadır. Özellikle asimetrik yükler altında her elemanın farklı gerilme durumlarına maruz kalabileceği tespit edilmiş ve tasarımının buna göre yapılması sistem stabilitesi için önemlidir. Çekme ve basınç gerilmelerine karşı dayanıklı çubuk ve kiriş kesitlerinin seçimi önemlidir. Sonuçlar, kubbe modelinin yapısal stabilize, güvenlik ve dayanıklılık açısından gereksinimleri karşıladığını ve farklı yük durumları altında başarılı bir performans sergilediğini göstermektedir.

Bu çalışmanın sonucunda, çift katmanlı çelik kubbe modelinin analiz ve tasarımının başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği ve yapısal hesaplamaların doğru yapıldığı ortaya çıkmıştır. Kubbe geometrisi, çift katmanlı yapısı ve yük durumlarına bağlı olarak farklı gerilmelere maruz kalma durumunu göstermektedir. Tasarım sürecinde, çekme ve basınç gerilmelerine uygun elemanların seçilmesi sistem güvenliği için önemlidir. Kubbe modelinin yapısal gereksinimleri karşılaması, güvenlik sağlaması ve dayanıklılığı göz önünde bulundurulduğunda, bu çalışma başarılı bir sonuç elde edilmiştir.

Bu çalışma, inşaat ve yapı mühendisleri, mimarlar, yapısal analiz ve tasarım uzmanları için yararlı olabilir. Ayrıca, çift katmanlı kubbe sistemleri veya benzer yapısal sistemlerin analizi ve tasarımıyla ilgilenen araştırmacılar, akademisyenler ve öğrenciler de bu çalışmadan faydalanabilir. Yapı mühendisliği alanında çalışan profesyoneller, bu çalışmadaki bulguları ve yöntemleri gerçek dünya projelerinde kullanarak yapıların dayanıklılığını ve performansını artırabilir. Mimari ve yapısal tasarım süreçlerinde, çift katmanlı kubbe sistemlerinin özellikleri ve davranışlarına ilişkin bu çalışmanın sonuçlarından yararlanarak daha güvenli ve etkili tasarımlar yapılabilirler.

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”

Kaynaklar

- [1] TS EN 1991-1-3, Yapılar üzerindeki etkiler – Bölüm 1-3: Genel etkiler, kar yükleri, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, 2009.
- [2] TS EN 1991-1-4, Yapılar üzerindeki etkiler – Bölüm 1-4: Genel etkiler - rüzgâr etkileri, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, 2005.
- [3] Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Ankara: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2018.
- [4] Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik, Ankara: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2018.
- [5] AISC 360-16, Specification for Structural Steel Buildings, Chicago: American Institute of Steel Construction, 2016.
- [6] S. P. Timoshenko ve S. Woinowsky-Krieger, Theory of Plates and Shells, Singapore: McGraw-Hill, 1959.
- [7] S. P. Timoshenko, Theory of Elastic Stability, New York: McGraw-Hill Book Co. Inc, 1961.
- [8] C. M. Papadopoulos ve M. T. LoRicco, «Symmetry-adapted computation: A case study of the Bucharest dome,» %1 içinde *In Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering*, Montreal, Canada, 2006.
- [9] K. Soykan, Çelik uzay kubbe sisemlerin ağırlıkça optimum dizaynı, (Yüksek lisans tezi). Selçuk Üniversitesi: Konya, 2007.
- [10] C. Çiftçi, Stability of steel dome structures, (Yüksek lisans tezi). Boğaziçi Üniversitesi: İstanbul, 2009.
- [11] U. Karabulut, Geniş açıklıklı uzay kafes sistemlerin ilgili türk ve avrupa standartları uyarınca karşılaştırmalı olarak incelenmesi, (Yüksek lisans tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi: Trabzon, 2018.
- [12] T. Kara, Tek tabakalı kubbelerin taşıyıcı sistemlerinin yönetmelikler açısından değerlendirilmesi, (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi: İstanbul, 2019.
- [13] M. Özcan, Tek katmanlı uzay kafes kubbelerde çapraz eleman kullanımının tasarıma etkisinin belirlenmesi, (Yüksek lisans tezi). Akdeniz Üniversitesi: Antalya, 2019.
- [14] G. Yılmaz, Tek Katmanlı Uzay Kafes Kubbelerde Berkitme Elemanı Kullanımının Tasarıma Etkisinin Belirlenmesi, (Yüksek lisans tezi). Akdeniz Üniversitesi: Antalya, 2021.
- [15] A. Adnanoğlu, Farklı açıklıklara sahip dolu gövdeli kubbe kafes sistemler ile dairesel boşluklu kubbe kafes sistemlerin tasarım ve maliyet karşılaştırılması, (Yüksek lisans tezi). Akdeniz Üniversitesi: Antalya, 2022.
- [16] F. Wang ve G. Jiang, «Numerical Investigations of Wind Loads on Spherical Structures with Various Types of Configurations,» *Buildings*, pp. 12(11), 1832, 2022.
- [17] M. A. Bektaş, Çelik Uzay Kafes Kubbe Sistemlerinin Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği ve Türk Çelik Yapılar Tasarım Yönetmeliğine Göre Analiz ve Tasarımı, Dicle Üniversitesi (Yüksek Lisans Tezi).Diyarbakır, 2023.
- [18] A. H. Glenn, «Snap-Through Instability Patterns in Truss Structures,» %1 içinde *In 51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference 18th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 12th*, 2010.
- [19] Y. Li ve Y. L. Xu, «Tuning and switching of band gap of the periodically undulated beam by the snap through buckling,» *AIP Advances*, p. 7(5), 2017.

Ek A

AISC 360-10 STEEL SECTION CHECK (Summary for Combo and Station)
 Units : KN, m, C

Frame : 887 X Mid: -8,174 Combo: 1,2G_1,6Q_0,5SL Design Type: Brace
 Length: 2,5 Y Mid: -7,36 Shape: TUBO-D76.1X3.2 Frame Type: SCBF
 Loc : 1,25 Z Mid: 0,75 Class: Compact Princpl Rot: 0, degrees

Provision: LRFD Analysis: Direct Analysis
 D/C Limit=1, 2nd Order: General 2nd Order Reduction: Tau-b Fixed
 AlphaPr/Py=0,282 AlphaPr/Pe=0,453 Tau_b=1, EA factor=0,8 EI factor=0,8

PhiB=0,9 PhiC=0,85 PhiTY=0,9 PhiTF=0,75
 PhiS=0,9 PhiS-RI=1, PhiST=0,75

A=7,329E-04 I33=0, r33=0,026 S33=1,282E-05 Av3=3,653E-04
 J=0, I22=0, r22=0,026 S22=1,282E-05 Av2=3,653E-04
 E=210000000, Fy=355000, Ry=1,1 z33=1,702E-05
 RLLF=1, Fu=510000, z22=1,702E-05

HSS Welding: ERW Reduce HSS Thickness? No

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS (Combo 1,2G_1,6Q_0,5SL)
 Location Pu Mu33 Mu22 Vu2 Vu3 Tu
 1,25 -73,281 0,042 0, 0, 0,

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO (H1-1a)
 D/C Ratio: 0,657 = 0,65 + 0,007 + 0,
 = (Pr/Pc) + (8/9) (Mr33/Mc33) + (8/9) (Mr22/Mc22)

AXIAL FORCE & BIAxIAL MOMENT DESIGN (H1-1a)
 Factor L K1 K2 B1 B2 Cm
 Major Bending 1, 1, 1, 1, 1, 1,
 Minor Bending 1, 1, 1, 1, 1, 1,

LtB Kltb Cb
 LTB 1, 1, 1,316

Pu phi*Pnc phi*Pnt
 Force Capacity Capacity
 Axial -73,281 112,807 234,162

Mu phi*Mn phi*Mn phi*Mn
 Moment Capacity No LTB Cb=1
 Major Moment 0,042 5,438 5,438 5,438
 Minor Moment 0, 5,438

Tu Tn phi*Tn
 Moment Capacity Capacity
 Torsion 0, 5,69 4,267

SHEAR CHECK

Status	Vu	phi*Vn	Stress	Check
	Force	Capacity	Ratio	
Major Shear	0,	70,248	0, OK	
Minor Shear	0,	70,248	0, OK	

Kritik basınç yükü altındaki kesitin YDKT yöntemine göre tasarım detayları [17]

Ek B

AISC 360-10 STEEL SECTION CHECK (Summary for Combo and Station)
 Units : KN, m, C

Frame : 686 X Mid: -1,989 Combo: 0,9G_1,6W2 Design Type: Beam
 Length: 0,418 Y Mid: 5,175E-05 Shape: TUBO-D76.1X3.2 Frame Type: SCBF
 Loc : 0,418 Z Mid: 3,5 Class: Compact Princpl Rot: 0, degrees

Provision: LRFD Analysis: Direct Analysis
 D/C Limit=1, 2nd Order: General 2nd Order Reduction: Tau-b Fixed
 AlphaPr/Py=0,08 AlphaPr/Pe=0,004 Tau_b=1, EA factor=0,8 EI factor=0,8

PhiB=0,9 PhiC=0,85 PhiTY=0,9 PhiTF=0,75
 PhiS=0,9 PhiS-RI=1, PhiST=0,75

A=7,329E-04 I33=0, r33=0,026 S33=1,282E-05 Av3=3,653E-04
 J=0, I22=0, r22=0,026 S22=1,282E-05 Av2=3,653E-04
 E=210000000, Fy=355000, Ry=1,1 z33=1,702E-05
 RLLF=1, Fu=510000, z22=1,702E-05

HSS Welding: ERW Reduce HSS Thickness? No

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS (Combo 0,9G_1,6W2)

Location	Pu	Mu33	Mu22	Vu2	Vu3	Tu
0,418	20,819	0,	0,	0,011	0,	0,

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO (H1.2,H1-1b)

D/C Ratio: 0,044 = 0,044 + 0, + 0,
 = (1/2) (Pr/Pc) + (Mr33/Mc33) + (Mr22/Mc22)

AXIAL FORCE & BIAXIAL MOMENT DESIGN (H1.2,H1-1b)

Factor	L	K1	K2	B1	B2	Cm
Major Bending	1,	1,	1,	1,	1,	1,
Minor Bending	1,	1,	1,	1,	1,	1,

LTB	Lltb	Kltb	Cb
	1,	1,	1,002

Axial	Pu Force	phi*Pnc Capacity	phi*Pnt Capacity
	20,819	217,027	234,162

Major Moment	Mu Moment	phi*Mn Capacity	phi*Mn No LTB	phi*Mn Cb=1
	0,	5,438	5,438	5,438
Minor Moment	0,	5,438		

Torsion	Tu Moment	Tn Capacity	phi*Tn Capacity
	0,	5,69	4,267

SHEAR CHECK

Status	Vu	phi*Vn	Stress	Check
	Force	Capacity	Ratio	
Major Shear	0,011	70,248	0,	OK
Minor Shear	0,	70,248	0,	OK

CONNECTION SHEAR FORCES FOR BEAMS

Major (V2)	VMajor Left	VMajor Right
	0,011	0,011

Kritik çekme yükü altındaki kesitin YDKT yöntemine göre tasarım detayları [17]



Van ilinin kuraklığının SPI ve SPEI yöntemlerine göre değerlendirilmesi

Assessment of drought in Van province according to SPI and SPEI methods

Mahsum Aydın^{1*}

¹ Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, maydin@yyu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9739-4066>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 26 Ekim 2023
Revizyon 18 Kasım 2023
Kabul 24 Aralık 2023
Online 29 Mart 2024

Anahtar Kelimeler:

Kuraklık, SPI (Standart Yağış İndeksi), SPEI (Standart Yağış Evapotranspirasyon İndeksi), Van ili

ÖZ

Özellikle son yıllarda iklim değişikliğinin ve insan faaliyetlerinin bir sonucu olarak kuraklık olayının etkisi her geçen gün artmaktadır. Bunun sonucu olarak su kaynakları, tarım ve canlılar olumsuz olarak etkilenmektedir. Bu çalışmada, Van ilinin kuraklık olayından nasıl etkilendiğini tespit edebilmek amacıyla literatürde yaygın olarak kullanılan Standart Yağış İndeksi (SPI) ve Standart Yağış Evapotranspirasyon İndeksi (SPEI) yöntemleri kullanılarak 1,3,6,9 ve 12 aylık zaman periyotlarında kuraklık analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde SPI yöntemine göre aşırı kurak dönemlerin en çok görüldüğü bölge Erciş ilçesi olarak belirlenirken, aşırı nemli dönemlerin en çok görüldüğü bölge ise Özalp ilçesi olarak belirlenmiştir. SPEI yöntemine göre ise aşırı kurak dönemin en çok görüldüğü bölge Özalp ilçesi olurken, aşırı nemli dönemlerin en çok görüldüğü ilçeler ise özellikle uzun zaman periyotlarında Erciş ve Başkale ilçeleri olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak her iki yöntem genel olarak birbirine yakın sonuçlar verse de özellikle ekstrem kuraklık ve nemlilik olaylarının hesabında SPI yöntemine göre daha büyük değerlerin hesaplandığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde kuraklık değerlendirmesi için SPI yöntemine göre hesaplanan ekstrem olayların fazla olması nedeni ile dikkatli kullanılması, SPI yöntemi yerine sıcaklığın da etkisinin göz önüne alındığı SPEI yönteminin tercih edilebileceği değerlendirilmektedir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 26 October 2023
Received in revised form 18 November 2023
Accepted 24 December 2023
Available online 29 March 2024

Keywords:

Drought, SPI (Standard Precipitation Index) SPEI (Standard Precipitation Evapotranspiration Index), Van Province

Doi: 10.24012/dumf.1381660

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

The effects of drought have been increasing day by day, especially in recent years, as a result of climate change and human activities. Thus, water resources, agriculture and living organisms are negatively affected. In this study, in order to determine how Van province is affected by drought, drought analysis was carried out in 1,3,6,9 and 12-month time periods by using Standard Precipitation Index (SPI) and Standard Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) methods which are widely used in the literature. When the results obtained were analyzed, according to the SPI method, Erciş district was determined as the region with the most extreme drought periods, while Özalp district was determined as the region with the most extreme wet periods. According to the SPEI method, the region with the most extreme drought periods was determined as Özalp district, while the districts with the most extreme wet periods were determined as Erciş and Başkale districts, especially in long time periods. As a result, although both methods generally give similar results, it was observed that larger values were calculated according to the SPI method, especially in the calculation of extreme drought and wet events. Based on the results obtained, it is evaluated that the extreme events calculated according to the SPI method for drought assessment should be used with caution due to the high number of extreme events calculated according to the SPI method, and the SPEI method, which also takes into account the effect of temperature, can be preferred instead of the SPI method.

Giriş

Kuraklık, yağış eksikliğinden kaynaklanan su mevcudiyetindeki azalma olarak tanımlanmakta ve dünyanın en maliyetli doğal felaketlerinden biri olarak ifade edilmektedir [1-4]. Kuraklık olayının görülme sıklığı ve şiddeti özellikle iklim değişikliğinin etkisi ile son yıllarda artış göstermektedir [5]. Kuraklığın artan etkisinin özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde etkisini daha fazla ve uzun süreli olarak hissettireceği tahmin edilmektedir [4,6]. Kuraklığın etkisinin arttığı bölgelerde ekin veriminde azalmalar, orman yangını risklerinde artış ve arazilerin çölleşmesi gibi ciddi sorunlar ortaya çıkabilmektedir [7]. Kuraklık olayının incelenmesi ve değerlendirilmesi su kaynaklarının planlanması ve yönetilmesi açısından büyük bir öneme sahiptir [8]. Bu nedenle su kaynaklarının korunması ve gerekli önlemlerin alınabilmesi için kuraklığın büyüklüğü, sıklığı gibi özelliklerinin tahmin edilmesi gerekmektedir. Ancak kuraklık karmaşık bir yapıya sahiptir, zamana ve mekâna göre değişiklik gösteren bir olay olması nedeni ile tahmin edilmesi zordur [9].

Literatürde yapılan çalışmalarda kuraklık genellikle meteorolojik, hidrolojik, tarımsal kuraklık olarak sınıflandırılmaktadır. Meteorolojik kuraklıkta yağış en önemli parametre olarak ifade edilmekte ve yağışın normal değerlerin altına düşmesi sonrasında ise kuraklık olayının yaşanacağı ifade edilmektedir [10]. Bu nedenle literatürde meteorolojik kuraklığın tahmin edilmesi için birçok kuraklık indeksi yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden en yaygın olarak kullanılanı ise Standart Yağış İndeksi (SPI) yöntemidir [11]. Bu yöntemde girdi olarak sadece yağış verisi kullanılmakta ve hesaplanan değerler yardımı ile kuraklığın büyüklüğü ve sıklığı tahmin edilebilmektedir. Ancak kuraklık olayı üzerinde özellikle sıcaklığın etkisinin de büyük olduğu bilinmektedir. SPI yönteminde sadece yağışa bağlı olarak değerlendirme yapılmaktadır ancak sıcaklığın yüksek olduğu kurak bölgelerde evapotranspirasyonun başlıca su kaybı şekli olduğu düşünülecek olur ise Standart Yağış Evapotranspirasyon İndeksi (SPEI) yöntemi gibi sıcaklık değerlerinin de göz önünde bulundurulduğu bir kuraklık indeksi yönteminin kullanılması kuraklık tahminlerinin daha hassas yapılabilmesine yardımcı olacaktır [12,13].

SPEI ve SPI indeksleri kullanılarak Türkiye’de ve dünyada kuraklığın belirlenmesi, kuraklık frekansı ve süresi gibi özelliklerin belirlenmesi için birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalardan bazılarında aşağıda bahsedilmiştir.

Hernandez ve Uddameri [14] tarafından 2014 yılında yapılan çalışmada, Güney Teksas’ın beş iklim bölgesini temsil eden altı büyük şehir merkezi için iki emisyon senaryosuna (A1B, B1) göre SPI ve SPEI indeksleri iki genel sirkülasyon modelinden (PCM, HCM) elde edilen yağış ve sıcaklık projeksiyonları ile birlikte kullanılmıştır. Her iki sirkülasyon modelinden elde edilen veriler kullanılarak kuraklık indeksi yöntemleri ile yapılan hesaplamalarda 21. Yüzyıl boyunca bölgede giderek artan bir kuraklık öngörmüştür. SPI indeksi 21. yüz yılın ilk yarısında mevcut nemli dönem sayısında daha fazla değişkenlik gösterirken, SPEI indeksinin artan sıcaklığın neden olduğu bir azalış eğilimini gösterdiği tespit edilmiştir. Ancak 21. yüz yılın ikinci yarısındaki kuraklıkların nedeninin ise hem artan sıcaklıklar hem de azalan yağışlar olduğu tespit edilmiştir. Kuraklık etkilerinin

ise A1B senaryosunda B1 senaryosundan daha belirgin olduğu ve etkilerin genellikle iç bölgelerde kıyı bölgelerine göre daha güçlü hissedildiği belirlenmiştir.

Bacanlı vd. [15] 2017 yılında yaptıkları çalışmada, Kuzey Ege bölgesi kuraklık analizi için bölgede seçilen 29 adet meteoroloji gözlem istasyonuna ait yağış verilerini kullanmışlardır. SPI yöntemi ve Paylaştırılmış Entropi (PE) kuraklık indeksi yöntemleri kullanılarak kuraklık analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre PE yönteminin kuraklık tespitinde SPI yöntemi gibi kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

Tirivarombo vd. [13] 2018 yılında yapmış oldukları çalışmada, sosyoekonomik geçim kaynaklarının çoğunun suya bağlı olduğu kuzey Zambiya’da bulunan Kafue Havzası için SPI ve SPEI indekslerinin sonuçlarını karşılaştırmışlardır. SPEI indeksi ile yapılan hesaplamalarda SPI indeksine kıyasla şiddetli ve orta dereceli sınıflandırmalarda daha uzun süreli ve artan yoğunlukta kuraklık tespit edilmiştir. Öte yandan, SPI indeksi ile SPEI indeksine kıyasla aşırı kuraklık sınıflarında daha fazla kuraklık hesaplanmış, ancak şiddetli ve orta dereceli kuraklık sınıflandırmalarında ise daha kısa süreli ve daha az sayıda kuraklık tespit edilmiştir. Sonuç olarak sıcaklık değerlerinin kuraklığın karakterize edilmesinde önemli bir rol oynadığı görülmüştür. SPI indeksinin girdi olarak sadece yağış verilerine ihtiyaç duyması nedeni ile özellikle sıcaklık verilerinin eksik olduğu durumlarda kullanılmasının uygun olduğu değerlendirilmiş ve SPI indeksinin kuraklığın belirlenmesinde daha dikkatli kullanılması gerektiği ifade edilmiştir.

Abbasi vd. [16] 2019 yılında yaptıkları çalışmada Urmiye sinoptik istasyonu için kısa, orta ve uzun vadeli zaman ölçeklerinde kuraklığın izlenmesi ve tahmini amacıyla SPI, SPEI ve gen ekspresyonu programlama modellerini kullanmışlardır. Bu amaçla 1951-2009 yılları arasındaki aylık yağış ve sıcaklık verileri kullanılarak 1, 3, 6, 12, 24 ve 48 aylık zaman periyotları için SPEI hesaplanmış ve elde edilen değerler SPI yöntemi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, SPEI ve SPI’nın 3, 12 ve 48 aylık zaman periyotlarında korelasyon katsayısının sırasıyla 0.84, 0.845 ve 0.776 olarak belirlendiğini göstermiştir. Elde edilen değerler incelendiğinde ise istatistiksel dönem boyunca 1959-1967 ve 1998-2009 tarihleri arasında kuraklığın görüldüğü iki uzun zaman dilimi belirlenmiştir. SPEI zaman serilerine dayalı kuraklık hesaplamalarının ardından, 1 ila 5 aylık gecikmelerle gen ekspresyonu programlama modelleri kullanılarak kuraklık tahmin edilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, SPEI zaman periyodu büyütüldüğünde tahmin doğruluğu artırılmıştır, bu sayede bir aylık zaman periyodu için (SPEI1) test aşamasındaki elde edilen korelasyon katsayısı 0.215 iken 48 aylık zaman periyodunda (SPEI48) 0.984’e yükselmiştir ve modelin genel doğruluğu SPEI1’de %60.1 iken SPEI48’de %92.3’e yükselmiştir.

Bacanlı ve Akşan [17] tarafından 2019 yılında yapılan çalışmada Türkiye’nin Akdeniz Bölgesi’nde bulunan 8 meteoroloji gözlem istasyonuna ait 1970-2018 yılları arası sıcaklık ve yağış verileri kullanılarak her bir istasyon için 1,3,6,9 ve 12 aylık SPEI değerlerinin frekans analizleri hesaplanmıştır. Bu sayede kurak ve sulak dönemlerin dağılımlarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Akdeniz

Bölgesi'nde seçilen istasyonlar için hesaplanan SPEI değerleri incelendiğinde tüm istasyonlarda hafif kuraklık sınıfı ile normale yakın kuraklık sınıfı arasında olduğu tespit edilmiştir.

Mehr ve Vaheddoost [18] 2020 yılında yapmış oldukları çalışmada Türkiye'nin Ankara İli üzerindeki meteorolojik kuraklık olaylarının temel özelliklerini (süresi, şiddeti ve eğilimi) araştırmışlardır. Çalışma alanı içerisinde yer alan altı meteoroloji istasyonuna ait 46 yıllık gözlemlenen yağış ve sıcaklık verileri kullanılarak 3,6 ve 12 aylık zaman ölçeklerinde SPI ve SPEI indeksleri kullanılarak kuraklık tespit edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen kuraklık değerlerinin eğilimlerinin belirlenmesi amacıyla Spearman sıralama korelasyon yöntemi ve Şen'in Yenilikçi Eğilim Analizi yöntemi kullanılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde SPI ve SPEI yöntemleri arasında özellikle 6 ve 12 aylık zaman ölçeklerinde zamansal tutarsızlık olmasına rağmen, Ankara için 1971-2016 dönemleri arasında beş aşırı kuraklık olayı meydana geldiği tespit edilmiştir. Kuraklık trend sonuçları incelendiğinde ise SPEI indeksi için kuraklık olaylarında hafif bir düşüş trendi olduğu ancak SPI indeksinin aynı eğilimi göstermediği değerlendirilmiştir.

Bakanoğulları [19] tarafından 2020 yılında yapılan çalışmada İstanbul Büyükçekmece içme suyu havzasında yer alan Damlıca deresi havzasına ait 1982-2006 yılları arası 25 yıllık veri seti kullanılarak kuraklığın şiddetinin ve sıklığının SPEI indeksi kullanılarak belirlenmesi ve elde edilen sonuçların ise SPI değerleri ile karşılaştırılması amaçlanmıştır. Hesaplanan yıllık SPEI ve SPI indeksi değerleri arasında determinasyon katsayısı $R^2=0.977$ olarak hesaplanmış ve istatistiki olarak anlamlı bir ilişki tespit edilmiştir. Bunun yanında ise aylık, mevsimlik ve 6 aylık kuraklık değerlerinde farklılıklar tespit edilmiştir. SPEI indeksi ile havzada 4 yıl orta kurak, 7 yıl hafif kurak dönem belirlenirken, SPI indeksine göre 2 yıl şiddetli kurak, 3 yıl orta kurak ve 2 yıl hafif kurak dönem tespit edilmiştir. Özellikle tarımsal üretim için SPEI indeksi ile daha hassas değerlendirmeler yapılabileceği değerlendirilmiştir.

Liu vd. [20] 2021 yılında yaptıkları çalışmada SPI ve SPEI değerlerini, 1961'den 2019'a kadar Sichuan Eyaletindeki 44 meteoroloji istasyonunun verilerine dayanarak hesaplamışlardır ve farklı zaman ve mekan ölçeklerinde kuraklık karakteristik trendlerini belirlemek için Mann-Kendall eğilim testi ve çok değişkenli doğrusal regresyon yöntemlerini kullanmışlardır. Sonuç olarak SPEI kuraklık değerlerinin trendinin düz ve engebeli bölgelerde tüm zaman ölçeklerinde plato ve dağlık bölgelerdekenden daha yüksek olduğu, batıya göre daha uzun olduğu ve bu nedenle kuraklık eğilimlerinin kuzeybatıdan doğuya doğru geçiş yaptığını ifade etmişlerdir. Batı bölgesindeki kuraklık yoğunluğunun ise kademeli olarak arttığını ve kuraklık olaylarının çoğunlukla güneybatı platosunda ve merkezi dağlık bölgelerde meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Bu durumda kuraklığın meteorolojik olarak sıcak noktalar esas alınarak Sichuan havzasında yoğunlaştığı anlamına geldiği ifade edilmiştir. Çok değişkenli doğrusal regresyon yönteminin belirttiği yüksekliğin (H), Sichuan Eyaletindeki yağışın mekansal düzensizliğine neden olan ana etki faktörü olmadığı, ancak yüksekliğin (H), sıcaklığın (T), boylamın

(Lo) ve enlemin (La) yağışı birlikte belirleyebileceği ifade edilmiştir.

Aktürk vd. [21] 2022 yılında yaptıkları çalışmada Kırıkkale ili kuraklığı ve kuraklık özelliklerini değerlendirmek için SPI ve SPEI indekslerini kullanarak kuraklık analizi yapmışlardır. Bu amaçla seçilen istasyona ait 1963-2018 yılları arası bölgeye ait meteorolojik veriler kullanılmış ve 1, 3, 6, 9 ve 12 aylık farklı zaman periyotları için SPI ve SPEI değerlerini hesaplamışlardır. SPEI indeksi için gerekli olan Potansiyel Evapotranspirasyon (PET) değerleri Thornthwaite (T) ve Hargreaves (H) yöntemleri ile hesaplanmış ve her istasyon için iki farklı SPEI zaman serisi elde edilmiştir. 1, 3, 6, 9 ve 12 aylık farklı zaman periyotları için SPI, SPEI(T) ve SPEI(H) sonuçları arasında korelasyon katsayıları belirlenmiştir, farklı zaman periyotlarındaki kuraklık indeksi değerleri arasındaki ilişkiler değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde ve her indeks kendi içinde değerlendirildiğinde zaman periyodu büyüdükçe korelasyon değerinde azalma olduğu görülmüştür. Karşılaştırmalar sonucunda aynı zaman periyotları için en büyük korelasyon SPEI(T) ve SPEI(H) yöntemleri arasında 12 aylık zaman periyodu için elde edilmiştir. Ayrıca, en düşük korelasyon değeri SPI ve SPEI(H) yöntemleri arasında 1 aylık zaman periyodu için elde edilmiştir. SPEI(H) yöntemi ve SPEI(T) yöntemi arasında belirlenen korelasyon değerleri incelendiğinde, iki yöntem arasında ilişkinin daha fazla olduğu ve zaman periyodu büyüdükçe korelasyon değerlerinin arttığı görülmüştür. SPI, SPEI(T) ve SPEI(H) yöntemleri ile kıyaslandığında SPI yönteminin diğer iki yöntem ile kuvvetli ilişkisi olduğu değerlendirilmiştir.

Çalışma alanı olarak seçilen Van ili ve sınırları içerisinde yer aldığı Van Gölü havzasının kuraklığının belirlenmesi için daha önce yapılan çalışmalardan bazıları ise aşağıdaki gibidir.

Yetmen [22] 2013 yılında yaptığı çalışmasında Van Gölü Havzası sınırları içerisinde yer alan Van istasyonu ve Tatvan istasyonu için 1975-2008 yılları arası kuraklık analizini SPI yöntemine göre yapmıştır. Çalışmada elde edilen 1, 3 ve 12 aylık kuraklık değerleri incelendiğinde Van Gölü havzası için kuraklık olasılığının %45 olduğu değerlendirilmiştir. Havzadaki en uzun ve şiddetli kuraklığın 1996 ile 2002 yılları arasında gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu şiddetli kurak dönem içerisinde Tatvan istasyonu ve Van istasyonu için 2000-2001 yılları arasında sırasıyla 11 ay ve 12 ay süreli kuraklık görülmüştür. Ayrıca elde edilen SPI değerleri ile Kuzey Atlantik Salınımı (KAS) arasında Ocak, Şubat ve Mart ayları için orta düzeyde negatif korelasyon belirlenmiştir.

Çelik vd. [23] 2018 yılında yaptıkları çalışmada Doğu Anadolu Bölgesi'nin 1967-2017 yılları arası mevsimsel kuraklığını incelemişlerdir. Mevsimlik kuraklığın değerlendirilmesi amacıyla SPI yöntemi kullanılmıştır. Bölgede toplam 14 ilin kuraklık değerlendirilmesi yapılmıştır. İklim sınıflandırması için ise Thornthwaite, Erinc, De Martonne ve Aydeniz indisleri kullanılmıştır. Çalışmada Malatya, Elazığ, Tunceli, Van ve Kars illeri için artan bir kuraklık eğilimi olduğu değerlendirilmiştir. Bingöl, Bitlis, Hakkari ve Iğdır illeri için ise nemli dönemlerde artan bir eğilim tespit edilmiştir. Çalışmada kullanılan iklim sınıflandırmalarına göre bazı kurak özellikteki istasyonlarda ilerleyen dönemlerde nemli, bazılarında ise tamamen kurak iklim koşullarının oluşacağı değerlendirilmiştir.

Öz [24] tarafından 2020 yılında yapılan çalışmada Van Gölü havzası sınırları içerisinde yer alan 14 meteoroloji gözlem istasyonuna ait 1968-2018 yılları arası meteorolojik verileri kullanarak kuraklık analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kuraklığın belirlenmesi amacıyla Standart Yağış İndeksi (SPI), Yağış Anomali indeksi (NYİ), Normal Yağışın Yüzdesi (NYY) ve Erinç İndeksi (EI) kullanılmıştır. Kuraklık sonuçları incelendiğinde 1984, 2000 ve 2013 yılları için havza genelinde kuraklık tespit edilmiştir. Kullanılan kuraklık indeksi yöntemlerinin sonuçlarının ise birbirine benzer olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlar ışığında havzanın %28'lik kısmı hafif yağışlı, %45'lik kısmı hafif kurak ve %19'luk kısmı ise orta derecede kurak olarak tespit edilmiştir. İncelenen dönemler arasında en şiddetli kuraklık ise Doğubayazıt istasyonunda 2013 yılının Ağustos ayında gerçekleşmiştir. Sonuç olarak Van Gölü Havzası için hafif ve orta kurak değerlendirilmesi yapılmıştır.

Erdem vd. [25] 2021 yılında yaptıkları çalışmada Van Gölü Havzasının 1989-2019 yılları arası kuraklığının Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve uzaktan algılama tekniği kullanılarak analiz edilmesini amaçlamışlardır. Bu amaçla arazi yüzey sıcaklıkları (LST) ve arazi kullanımı haritaları (LULC) Landsat-5 ve Landsat-8 uydu görüntülerinden elde edilmiştir. Kuraklık sadece CBS ve uzaktan algılama kullanılarak değil ayrıca SPI yöntemi kullanılarak da tespit edilmiştir. LST değerlerinin 1989, 1999 ve 2010 yıllarına kıyasla 2015 ve 2019 yıllarında artış gösterdiği belirlenmiştir, LULC'de ise önemli bir değişiklik olmadığı görülmüştür. SPI ile yapılan hesaplamalar ışığında 1991 ile 1994 yılları arasında orta, şiddetli ve aşırı yağışlı kategoride olduğu değerlendirilmiştir. Uydu ile elde edilen veriler ile SPI değerleri arasında ise yüksek düzeyde uyum olduğu tespit edilmiştir.

Özer ve Yalçın Coşkun [26] tarafından 2021 yılında yapılan çalışmada Van Gölü Havzası meteorolojik kuraklığının belirlenmesi amacıyla SPI yöntemi kullanılmıştır ve ArcGIS programı yardımıyla Ters Mesafe Ağırlıklı enterpolasyon (IDW) yöntemi ile kuraklık haritaları oluşturulmuştur. Elde edilen haritalar yardımıyla 2010-2019 yılları arasında değerlendirmeler yapılmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde Havza'da 2012, 2013, 2016 ve 2019 yıllarında ciddi kuraklık görüldüğü belirlenmiştir. Havza kuraklığının sadece iklim değişikliği nedeni ile değil aynı zamanda yanlış sulama tekniklerinden, teknolojik sistem eksikliğinden ve halkın bilinçlendirilmemesinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Uygun stratejiler geliştirilmesi durumunda havza için kuraklık riskinin azaltılabileceği değerlendirilmektedir.

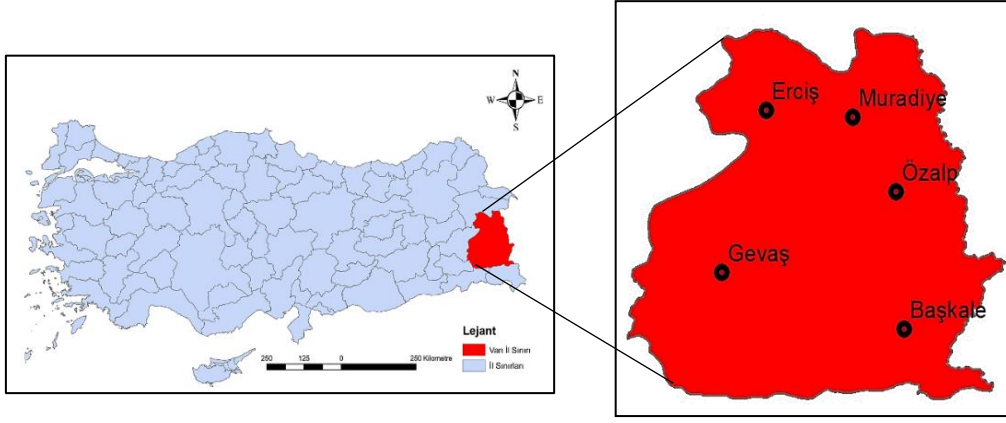
Seçilen çalışma alanının kuraklığının belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmalar incelendiğinde genellikle SPI yönteminin

kullanıldığı görülmektedir. Ancak yukarıda bahsedilen çalışmalardan da anlaşılacağı üzere sadece yağış verilerinin girdi olarak kullanılması nedeni ile SPI yönteminin kuraklığın tanımlanmasında daha dikkatli kullanılması gerekmektedir. Ayrıca SPI değerleri hesaplanırken normal dağılım yerine gamma dağılımının kullanılması ile daha iyi sonuçlar elde edilebileceği belirtilmektedir. Bu nedenle çalışmada kuraklığın daha hassas bir şekilde belirlenebilmesi amacıyla SPI değerlerinin hesaplanmasında gama dağılımı kullanılmıştır. Ayrıca kuraklığın belirlenmesi için yağış verilerinin yanında sıcaklık değerlerini de göz önünde bulundurarak hesaplama yapan SPEI indeksi literatürde yaygın olarak kullanıldığından, çalışma alanının kuraklığının belirlenmesi için SPEI yöntemi de kullanılmıştır. Ancak SPI ve SPEI yöntemleri ile elde edilen sonuçlar analiz yapılan bölge için farklı kuraklık yorumlamalarına neden olabilmektedir. Bu nedenle son yıllarda kuraklığın olumsuz etkilerinin oldukça fazla hissedildiği yarı kurak iklim bölgesinde yer alan Van ilinin kuraklık analizinin SPI ve SPEI yöntemleri ile karşılaştırmalı olarak yapılması amaçlanmıştır. Çalışmada Van ili sınırları içerisinde yer alan 5 adet meteoroloji gözlem istasyonuna ait 1982-2018 yılları arası yağış ve sıcaklık verileri kullanılarak SPI ve SPEI indeksleri yardımı ile 1, 3, 6, 9, 12 aylık zaman periyotları için kuraklık analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelenerek SPI ve SPEI yöntemlerinin sonuçlarının Van ili için bir birleri ile uyum içinde olup olmadığının ve hangi bölgelerde farklı sonuçların elde edildiğinin değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca literatürde daha önce Van ili için SPI ve SPEI kuraklık indeksi yöntemlerinin karşılaştırmalı bir analizi yapılmadığı için literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Materyal ve Yöntem

Çalışma Alanı ve Yeri

Doğu Anadolu Yukarı Murat-Van bölgesinde Van Gölü kapalı havzası içerisinde yer alan Van ili 20921 km²'lik yüz ölçümüne sahiptir. Van ili 38° 30' kuzey ve 43° 22' doğu enlemleri arasında yer almaktadır. İlde yazlar sıcak ve kurak, kışlar ise soğuk ve yağışlı geçmektedir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü verilerine göre yıllık ortalama sıcaklık 9.5°C ve yıllık toplam yağış 392.7 mm'dir [27]. Şekil 1'de Van ili ve seçilen istasyonların coğrafi konumlarına ait bilgiler verilmiştir. Van ili sınırları içerisinde seçilen istasyonların aylık ortalama sıcaklık ve yağış verilerine ait ortalama, standart sapma ve çarpıklık gibi istatistiksel bilgiler ise Tablo 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Çalışma alanı ve seçilen meteoroloji gözlem istasyonlarının coğrafi konumu

Tablo 1. Seçilen istasyonlara ait istatistiksel bilgiler

İstasyon Adı	Yağış verilerine ait istatistiksel bilgiler			Sıcaklık verilerine ait istatistiksel bilgiler		
	Ortalama	St. Sapma	Çarpıklık	Ortalama	St. Sapma	Çarpıklık
Başkale	36.23	32.43	1.809	6.38	9.42	-0.005
Erciş	34.32	28.28	1.017	8.02	9.69	-0.075
Gevaş	41.93	33.89	0.936	9.03	8.83	-0.031
Muradiye	46.76	37.06	1.504	8.96	9.85	-0.028
Özalp	41.94	36.99	1.656	6.13	10.64	-0.160

Standart Yağış İndeksi

Mckee vd. tarafından [28] 1993 yılında geliştirilen SPI yöntemiyle kuraklığın zamansal ve mekânsal olarak değişkenliğinin incelenmesi amaçlanmıştır [28,29]. Standart Yağış İndeksi (SPI), ilgilenilen herhangi bir zaman ölçeğindeki yağış zaman serilerini bir olasılık yoğunluk fonksiyonuna (PDF) uyarlar ve ardından ters normal dağılım fonksiyonu kullanarak elde edilen olasılıkları standart normal dağılıma dönüştürür. [30]. SPI indeksi meteorolojik kuraklığın belirlenmesinde en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Bunun nedeni SPI indeksinin diğer yöntemlere kıyasla daha kolay ve herhangi bir bölgeye uygulanabilir olmasıdır [31]. Guttman tarafından [32] 1999 yılında yapılan çalışmada SPI yönteminde gözlemlenen bir yağış serisini tanımlamak için normal dağılımdan farklı bir olasılık dağılımı kullanılırsa, elde edilen değerlerin de farklı olacağı ifade edilmektedir. Angelidis vd. [31] tarafından 2012 yılında yapılan çalışmada, gamma olasılık dağılım fonksiyonunun log-normal ve normal dağılımlara kıyasla farklı zaman periyotlarında SPI yöntemi ile hesaplanan kuraklık değerleri için daha iyi sonuçlar verdiği değerlendirilmiştir. Bu nedenle bu çalışmada SPI'nin hesaplanmasında yağış verisine bir gamma Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (PDF) uydurularak farklı zaman periyotları için SPI değerleri hesaplanmıştır. Gamma olasılık dağılım fonksiyonu Denklem 1'de tanımlanmıştır:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (1)$$

Burada α şekil parametresidir ve $\alpha > 0$ 'dır, β ölçek parametresidir ve $\beta > 0$ 'dır ve x ise yağış miktarıdır ve $x > 0$ 'dır. $\Gamma(\alpha)$ gamma fonksiyonudur ve Denklem 2'deki gibi tanımlanmaktadır:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (2)$$

Thom'un [33] 1958 yılında geliştirmiş olduğu yaklaşım kullanılarak dağılımın verilere uydurulabilmesi için gerekli olan α ve β parametreleri Denklem 3'te belirtildiği şekilde tahmin edilebilir:

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right), \beta = \frac{\bar{x}}{\alpha}, A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (3)$$

Yukarıdaki denklemde n değeri gözlem sayısını ifade etmektedir. Olasılık yoğunluk fonksiyonunu x 'e göre entegre etmek ve α ve β parametrelerini eklemek suretiyle $G(x)$ kümülatif olasılık dağılımı Denklem 4'teki gibi elde edilir:

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^\alpha e^{-\frac{x}{\beta}} dx \quad (4)$$

Yukarıdaki denklemde $t = x/\beta$ yazılacak olur ise Denklem 5'teki hale indirgenmiş olur

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (5)$$

Gamma dağılımı $x=0$ olan değerler için tanımlı olmadığından, veri setinde bulunabilecek olan $x=0$ değerlerinden dolayı oluşacak bu problemi giderebilmek amacıyla gamma dağılımı için kümülatif olasılık dağılım fonksiyonu Denklem 6'daki gibi modifiye edilebilir [34].

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (6)$$

Yukarıdaki denklemde q değeri sıfıra eşit olan yağış değerinin ($x=0$) olasılığını ifade etmektedir. Elde edilen

$$Z = SPI = - \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right), \quad t = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{H(x_k)^2} \right)} \quad 0 < H(x_k) < 0.5 \text{ için} \quad (7)$$

$$Z = SPI = - \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right), \quad t = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{(1 - H(x_k))^2} \right)} \quad 0.5 < H(x_k) < 1 \text{ için} \quad (8)$$

Tablo 2. SPI/SPEI değerlerine göre kuraklık sınıflandırması

SPI Değerleri	Kuraklık Sınıflandırması
2 veya daha fazlası	Aşırı Nemli
1.5-1.99	Çok Nemli
1-1.49	Orta Derece Nemli
0.99 - (-0.99)	Normale Yakın
(-1) - (-1.49)	Orta Derece Kurak
(-1.5) - (-1.99)	Çok Kurak
(-2) ve daha azı	Aşırı Kurak

Standart Yağış Evapotranspirasyon İndeksi (SPEI)

SPEI indeksi Vicente-Serrano vd. tarafından [37] 2010 yılında geliştirilmiş bir kuraklık indeksi yöntemidir. Bu yöntemde kuraklığın belirlenebilmesi amacıyla Potansiyel Evapotranspirasyon (PET) ve yağış verileri birlikte kullanılarak hesap yapılmaktadır [37,38]. Bu indeksin amacı su kaynaklarında meydana gelen kayıpların en önemlilerinden biri olan Evapotranspirasyon (ET) nedeni ile bölgede gerçekleşebilecek PET etkisinin dahil edilmesi için Palmer Kuraklık Şiddet İndeksi (PDSI) yönteminin buharlaşma miktarındaki artışa olan duyarlılığı ile SPI yönteminin çok zamanlı yapısını birleştirmektedir [37]. SPEI yöntemi girdi olarak aylık veya haftalık yağış ile PET arasındaki farkı kullanmaktadır. PET değerlerinin hesaplanmasında, genellikle veri gereksinimi olarak sadece aylık ortalama sıcaklık verisine ihtiyaç duyulan Thornthwaite yöntemi kullanılmaktadır [39]. Yağış ve PET arasındaki fark i ayı için Denklem 9 yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$D_i = P_i - PET_i \quad (9)$$

Burada D_i , aylık yağış P_i ve aylık potansiyel evapotranspirasyon PET_i arasındaki farktır. Farklı zaman

kümülatif olasılık dağılım fonksiyonu $H(x)$ ortalaması sıfır ve varyansı 1 olan standart normal rastgele değişken Z 'ye dönüştürülür. Abramowitz ve Stegun [35] tarafından 1965 yılında verilen yaklaşık dönüşümler kullanılarak Z ve SPI değerleri Denklem 7 ve Denklem 8'deki gibi hesaplanır [36]. Yukarıdaki denklemlerde verilen katsayılar $c_0 = 2.515517$, $c_1 = 0.802853$, $c_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189269$ ve $d_3 = 0.001308$ 'dir. Hesaplanan SPI değerleri kullanılarak Tablo 2 yardımıyla kuraklık sınıflandırması yapılabilmektedir.

ölçekleri için su bütçesi denklemi, Denklem 10'daki gibi yazılabilir.

$$D_n^k = \sum_{i=0}^{k-1} (P_{n-1} - PET_{n-i}), \quad n \geq k \quad (10)$$

Burada k zaman ölçeğini (ay) ve n zaman serisinin uzunluğunu ifade etmektedir [40].

Vicente-Serrano vd. 2010 yılında yaptıkları çalışmada hesaplanan D serisi ile Log-logistic dağılımı arasında iyi bir ilişki olduğunu tespit etmişlerdir. Log-logistic dağılımı negatif değerleri hesaba katabildiği için hesaplamalar için uygun bir dağılımdır. Log-logistic dağılımına göre D serisinin olasılık dağılım fonksiyonu Denklem 11'deki şekilde ifade edilmektedir [37,41].

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1} \quad (11)$$

Burada α, β ve γ sırasıyla ölçek, şekil ve orijin parametresidir. Log-logistic dağılımının parametrelerinin hesaplanması için en güçlü ve kolay yöntemin L-momentler yöntemi olduğu belirtilmektedir ve Denklem 12-14 yardımı ile hesaplanabilmektedir [38,42,43].

$$\beta = \frac{2w_1 - w_0}{6w_1 - w_0 - 6w_2} \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{(w_0 - 2w_1)\beta}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\Gamma\left(1 - \frac{1}{\beta}\right)} \quad (13)$$

$$\gamma = w_0 - \alpha\Gamma\left(\frac{1 + 1}{\beta}\right)\Gamma\left(\frac{1 - 1}{\beta}\right) \quad (14)$$

Burada $\Gamma(1 + 1/\beta)$ ifadesi $(1 + 1/\beta)$ değerinin gamma fonksiyonudur ve w_s ise s ($s=0,1,2,\dots$) mertebesinin olasılık ağırlıklı moment (PWMs) değeridir.

$$w_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{j - 0.35}{n}\right)^s D_i \quad (15)$$

Denklem 15'te n veri noktası sayısı ve j artan sırada gözlem aralığıdır. SPEI daha sonra aşağıdaki formüle göre $F(x)$ 'in standartlaştırılmış değerleri olarak hesaplanır.

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1W + C_2W^2}{1 + d_1W + d_2W^2 + d_3W^3} \quad (16)$$

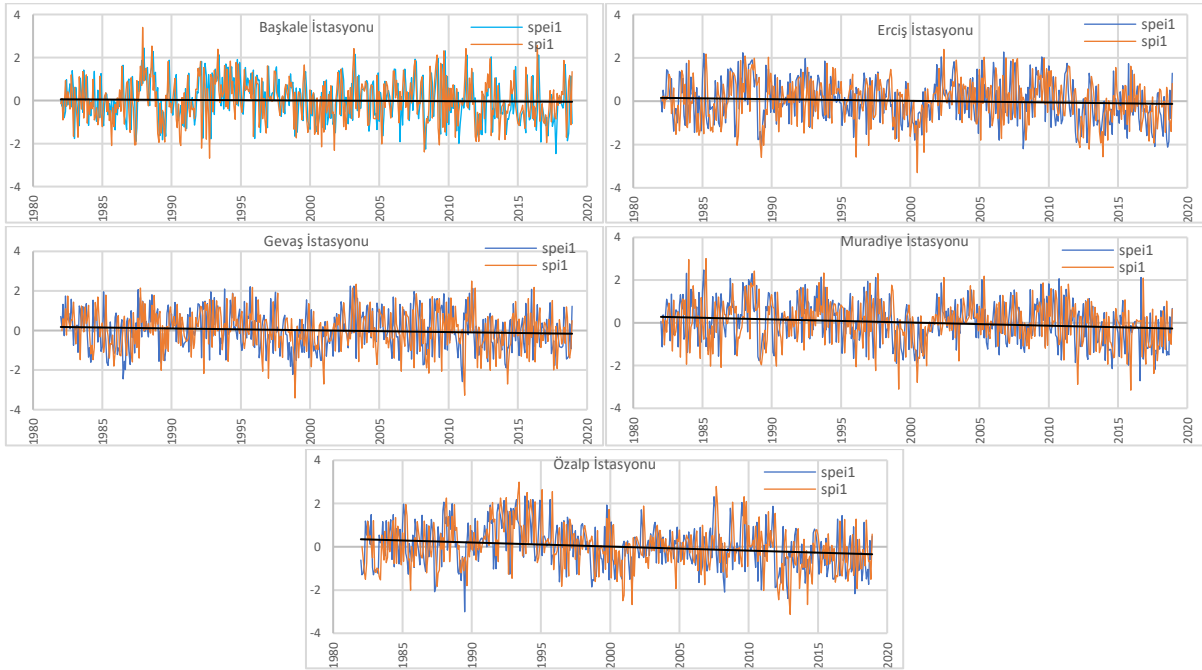
Yukarıdaki denklemdeki W değeri ise Denklem 17'de verilmiştir;

$$W = \sqrt{-2\ln(P)} \quad P \leq 0.5 \text{ için} \quad (17)$$

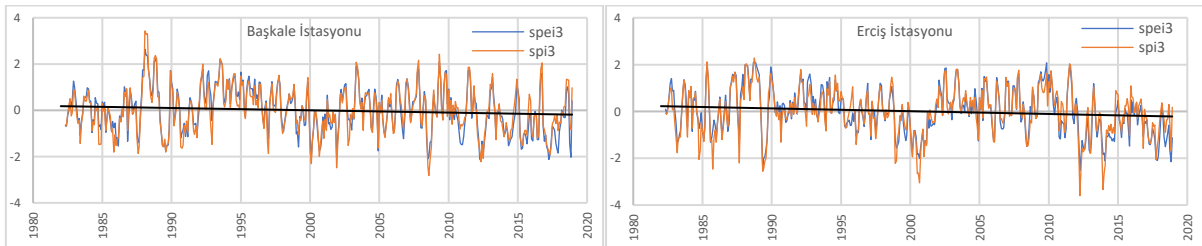
P değeri belirlenmiş bir D değerini aşma olasılığını ifade etmektedir, $P = 1 - F(x)$. Eğer $P > 0.5$ ise P değeri yerine $1 - P$ yazılır ve SPEI değerinin işareti tersine çevrilir. SPEI denkleminde kullanılan katsayılar ise $C_0 = 2.515517, C_1 = 0.802853, C_2 = 0.010328, d_1 = 1.432788, d_2 = 0.189269, d_3 = 0.001308$ olarak alınmaktadır [37]. Kuraklık sınırının belirlenmesi için ise SPI bölümünde verilen Tablo 2'deki alt ve üst sınırlardan yararlanılmaktadır.

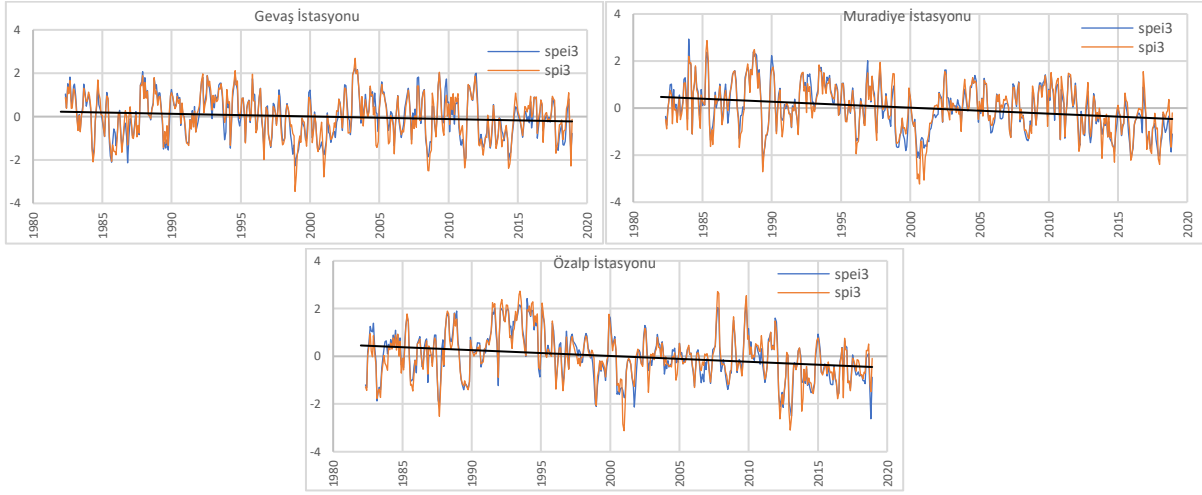
Bulgular

Van ili içerisinde yer alan 5 adet meteoroloji gözlem istasyonuna ait aylık ortalama sıcaklık ve yağış verileri kullanılarak SPI ve SPEI yöntemleri yardımıyla 1, 3, 6, 9 ve 12 aylık zaman periyotları için kuraklık analizi ayrı ayrı yapılmıştır. SPI ve SPEI indeksleri yardımıyla hesaplanan kuraklık değerleri aşağıda verilmiştir.

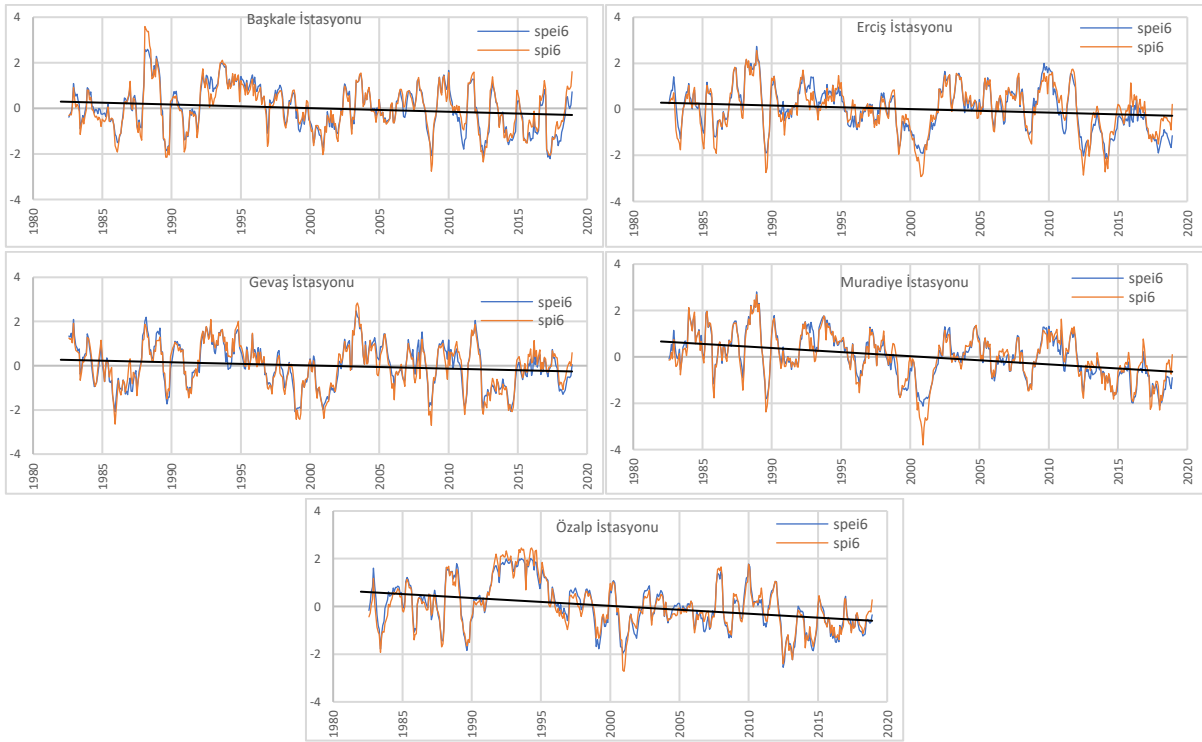


Şekil 2. Seçilen istasyonlara ait SPI-1 ve SPEI-1 değerleri

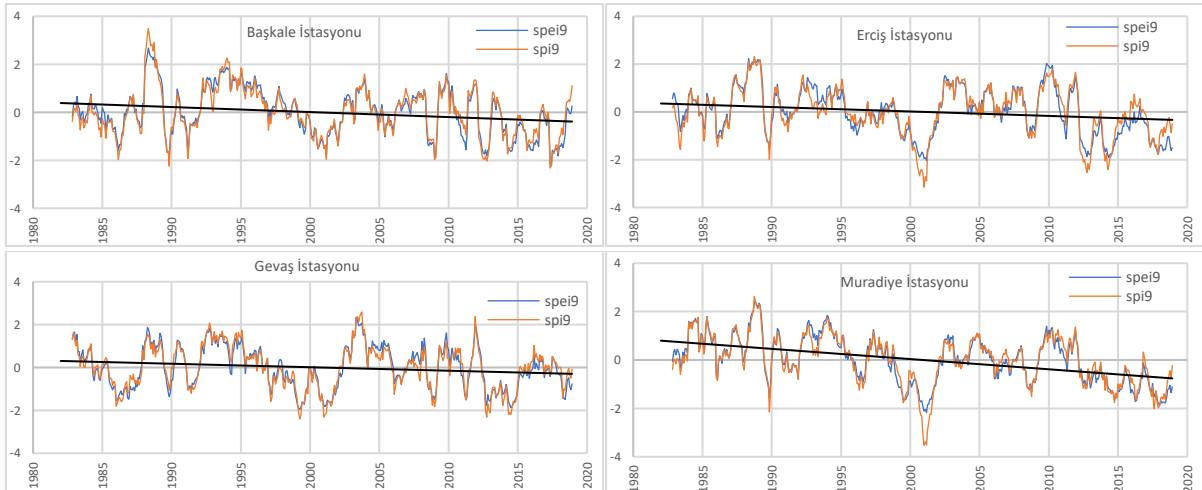


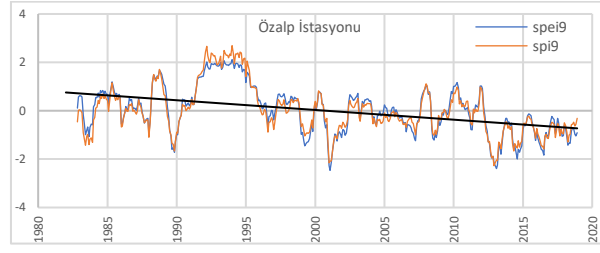


Şekil 3. Seçilen istasyonlara ait SPI-3 ve SPEI-3 değerleri

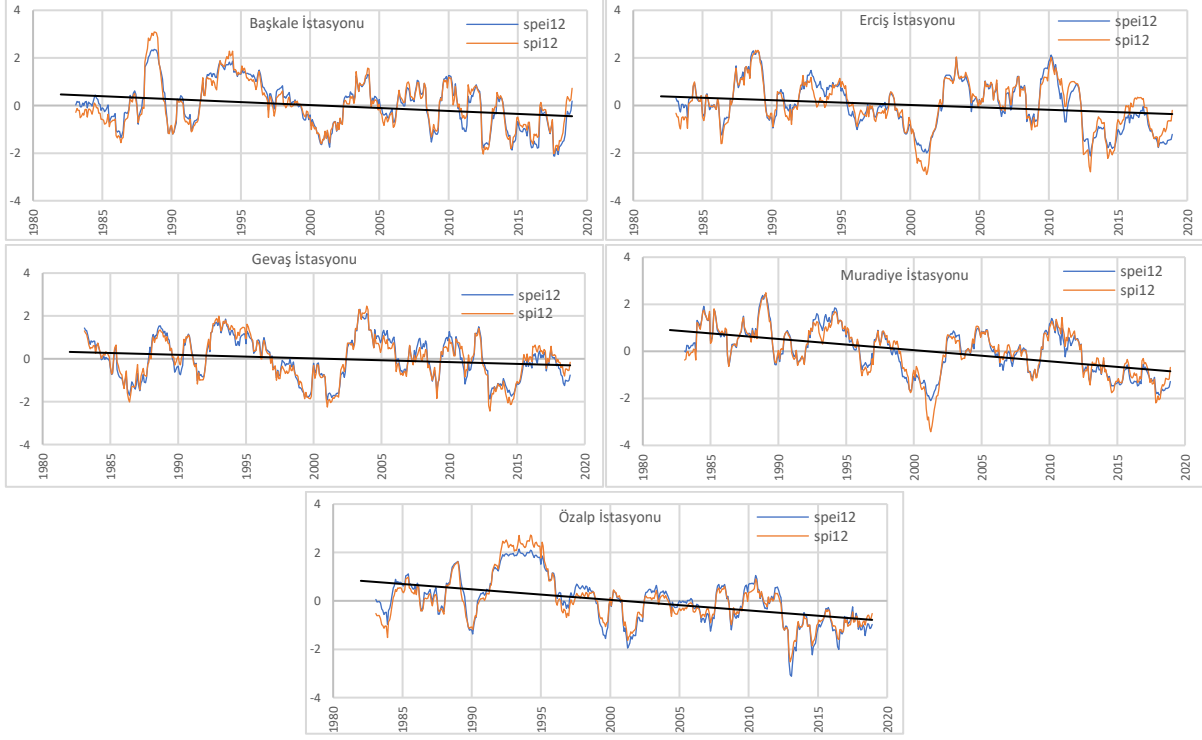


Şekil 4. Seçilen istasyonlara ait SPI-6 ve SPEI-6 değerleri





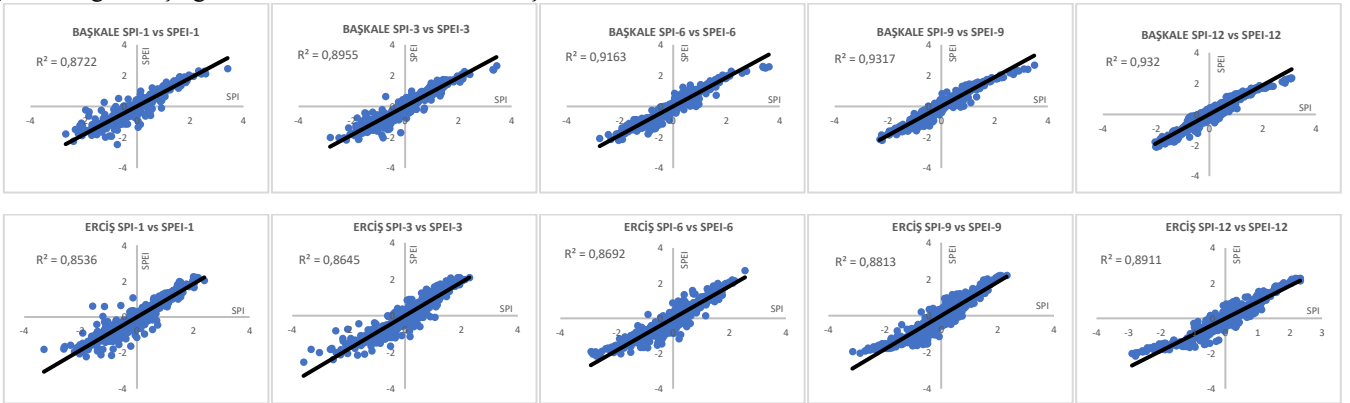
Şekil 5. Seçilen istasyonlara ait SPI-9 ve SPEI-9 değerleri

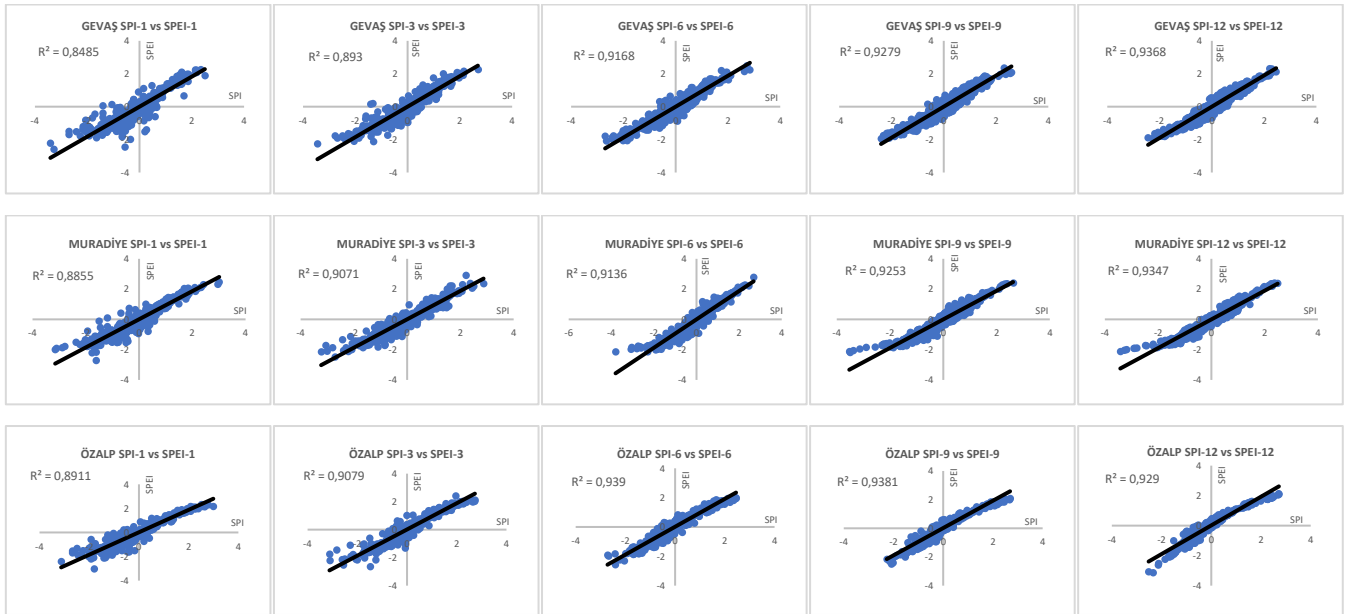


Şekil 6. Seçilen istasyonlara ait SPI-12 ve SPEI-12 değerleri

Yukarıdaki şekiller incelendiğinde Van ili sınırları içerisinde seçilen istasyonlara ait kuraklık hesaplamalarında SPI ve SPEI indeksleri ile birbirine yakın değerlerin elde edildiği, ancak SPI yöntemi ile hesaplanan ekstrem değerlerin SPEI indeksi ile hesaplanan ekstrem değerlerden daha büyük olduğu göze çarpmaktadır. Ayrıca her iki yöntem ile hesaplanan kuraklık değerlerinin gösterildiği grafiklerde çizilen eğilim çizgileri incelenecek olur ise seçilen tüm

istasyonlar için kuraklığın artan bir trende sahip olduğu görülmektedir. Her iki yöntem ile elde edilen sonuçların birbiri ile ilişkilerinin belirlenebilmesi amacı ile 1,3,6,9 ve 12 aylık zaman periyotları için korelasyon katsayıları hesaplanmış ve şekil 7'de sunulmuştur.

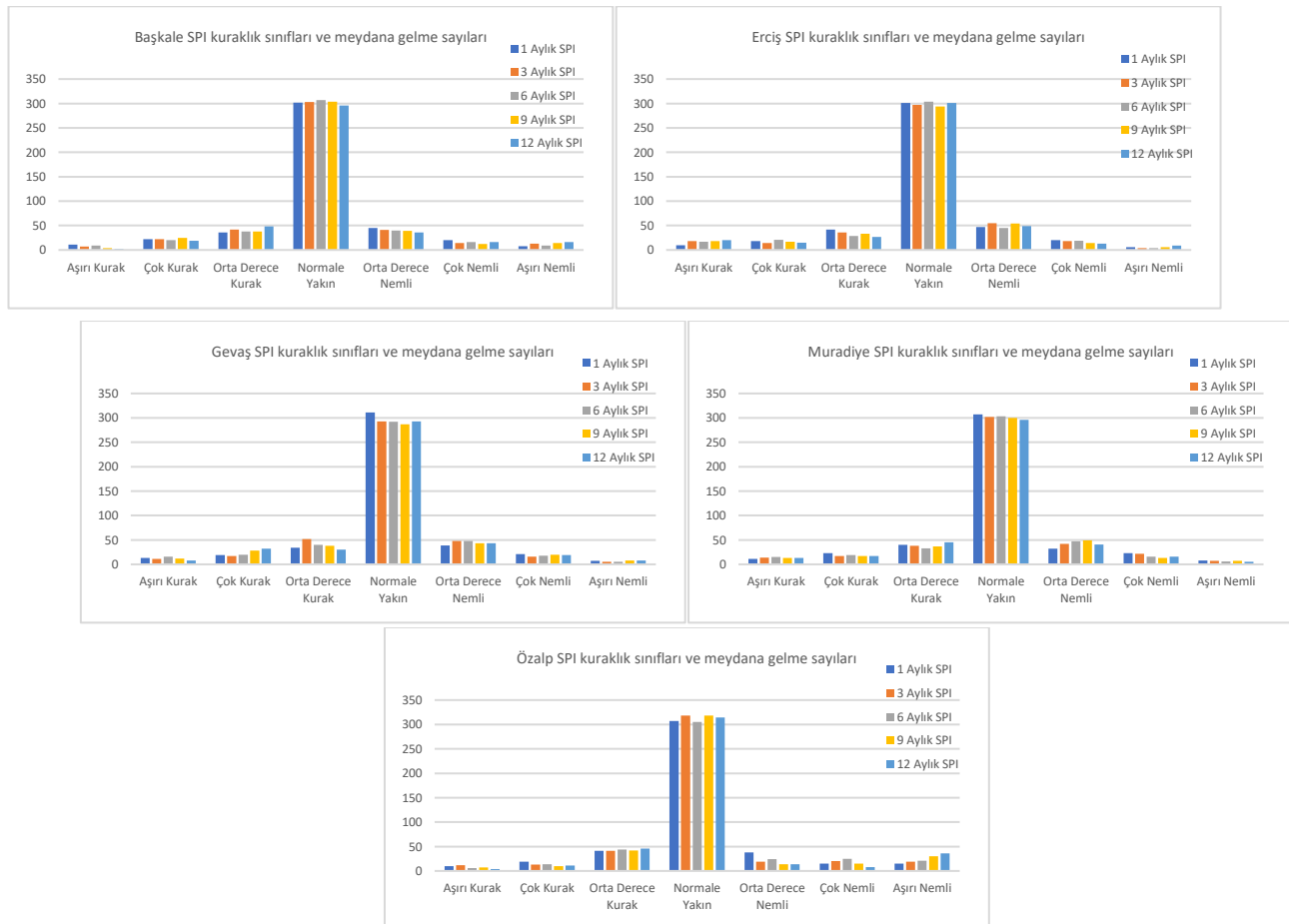




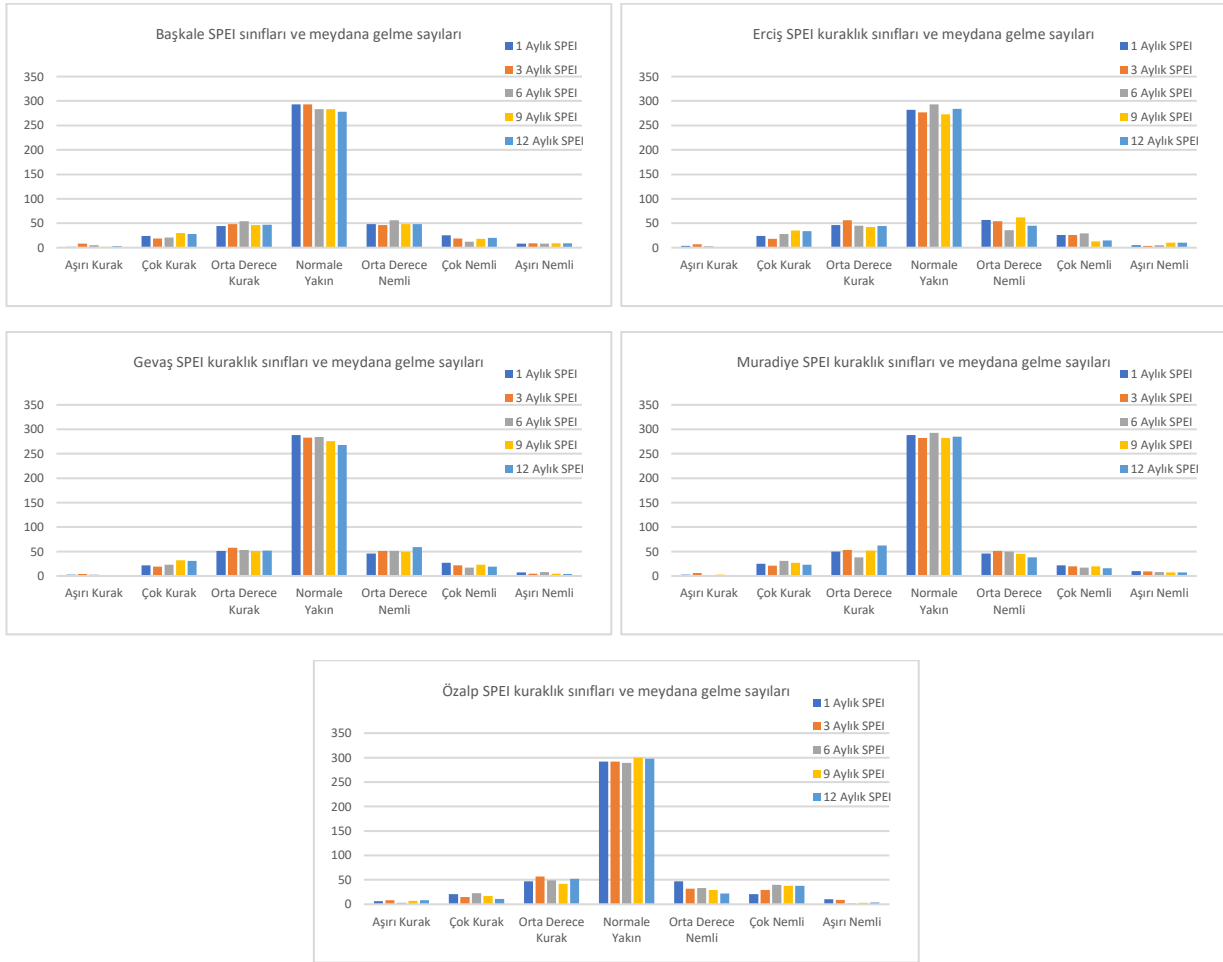
Şekil 7. Seçilen istasyonlar için hesaplanan SPI ve SPEI değerleri arasındaki korelasyon katsayıları

Şekil 7 incelendiğinde tüm zaman periyotları için SPI ile SPEI indeksleri ile hesaplanan değerler arasında seçilen tüm istasyonlarda kuvvetli bir korelasyon olduğu söylenebilir. Özellikle uzun zaman periyotlarında seçilen tüm istasyonlarda korelasyon katsayısının daha yüksek olduğu göze çarpmaktadır.

SPI ve SPEI yöntemleri ile seçilen istasyonlarda 1,3,6,9 ve 12 aylık zaman periyotları için hesaplanan her bir kuraklık sınıfının meydana gelme sayıları aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



Şekil 8. SPI indeksine göre 1, 3, 6, 9 ve 12 aylık periyotlarda seçilen istasyonlarda hesaplanan Aşırı Kurak, Çok Kurak, Orta Derece Kurak, Normal, Orta Derece Nemli, Çok Nemli, Aşırı Nemli dönem sayıları



Şekil 9. SPEI indeksine göre 1, 3, 6, 9 ve 12 aylık periyotlarda seçilen istasyonlarda hesaplanan Aşırı Kurak, Çok Kurak, Orta Derece Kurak, Normal, Orta Derece Nemli, Çok Nemli, Aşırı Nemli dönem sayıları

Şekil 8 ve Şekil 9 incelendiğinde, aşırı kurak dönemlerin 9 ve 12 aylık zaman periyotlarında SPI yöntemine göre en fazla Erciş ilçesinde, SPEI yöntemine göre ise en fazla Özalp ilçesinde görüldüğü belirlenmiştir. Çok kurak dönemlerin SPI yöntemine göre özellikle 9 ve 12 aylık zaman periyotlarında en çok Gevaş istasyonunda meydana geldiği tespit edilirken, SPEI yöntemine göre ise sırasıyla Erciş Gevaş ve Başkale ilçelerinde birbirine yakın ve benzer sonuçlar hesaplandığı görülmüştür. Orta derece kurak sınıf için hesaplanan değerler incelendiğinde SPEI indeksine göre en fazla sayıda Erciş istasyonunda 9 aylık periyot için hesaplanmış, SPI yöntemine göre ise Özalp istasyonunda en az sayıda orta derecede kuraklık olayı tespit edilmiştir. Normal dönem sayıları incelendiğinde ise hem SPI hem de SPEI indeksi yöntemlerine göre tüm istasyonlarda benzer değerlerin hesaplandığı görülmektedir. Orta derece nemli dönem incelendiğinde Özalp ilçesi için her ne kadar SPEI yöntemi ile daha fazla sayıda meydana gelme durumu tespit edilmişse de her iki yönteme göre de en az meydana geldiği ilçenin Özalp ilçesi olduğu belirlenmiştir. Diğer ilçeler incelendiğinde, SPEI yöntemine göre 9 aylık zaman periyodu için Erciş ilçesi ve 12 aylık zaman periyodu için ise Gevaş ilçesinde en fazla meydana geldiği tespit edilmiştir. Diğer ilçelerde ise her iki yönteme göre benzer durum tespit edilmiştir. Çok nemli dönem SPEI yöntemine göre Özalp ilçesinde özellikle 6, 9 ve 12 aylık zaman periyotlarında Erciş istasyonunda ise 6 aylık zaman periyodunda meydana gelmiştir. Diğer

istasyonlarda ise SPEI yöntemine göre hesaplanan meydana gelme sayılarının SPI yöntemine göre daha fazla olduğu görülmüştür. Aşırı nemli dönem için SPI yöntemine göre en fazla Özalp ilçesinde hemen ardından ise Başkale istasyonunda en fazla sayıda görüldüğü tespit edilmiştir.

Sonuç

Bu çalışmanın amacı özellikle kuraklığın etkisinin son yıllarda arttığı Van ilinin kuraklık analizini literatürde yaygın olarak kullanılan SPI ve SPEI yöntemlerini kullanarak farklı zaman periyotları için yapmaktır. Özellikle yağış verilerinin uzun dönemde gamma dağılımı ile daha iyi ifade edilebilmesi nedeni ile SPI yöntemi ile hesaplama yapılırken gamma dağılımı kullanılmıştır. Ayrıca kuraklığın parametrelerinden biri yağış eksikliği olarak ifade edilebilir iken diğer bir parametre olarak sıcaklık da göz önüne alınması gereken bir parametre olduğundan, çalışmada sıcaklık verilerini de kullanarak hesaplama yapan SPEI yöntemi de tercih edilmiştir. SPI yöntemine göre Van ili sınırları içerisinde Erciş ilçesinde aşırı kurak ve Özalp ilçesinde ise aşırı nemli dönemlerin meydana gelme sayıları daha fazla olarak belirlenmiştir.

SPEI yöntemine göre ise Özalp ilçesinde aşırı kurak dönemin meydana gelme sayısı daha yüksek hesaplanmış, bunun yanında Başkale ve Erciş ilçelerinde ise özellikle 9 ve 12 aylık zaman dilimlerine göre aşırı nemli dönemin meydana gelme sayılarının daha fazla olduğu tespit

edilmiştir. Hesaplanan kuraklık büyüklükleri incelendiğinde SPI yöntemi ile özellikle aşırı kurak ve aşırı nemli gibi ekstrem bölgeler için hesaplanan meydana gelme sayılarının SPEI yöntemi ile hesaplanan sayılardan oldukça fazla olduğu görülmektedir. Bu durum da değerlendirme yapılan bölgelerin daha kurak olarak değerlendirilmesine sebep olabilmektedir. SPI ve SPEI indekslerine göre Van ili için değerlendirme yapıldığında kuraklıktan en çok etkilenen ve aşırı yağışlı dönemlerin en çok görüldüğü bölgelerin Van ili için farklılık gösterdiği görülmüştür. Bu nedenle özellikle kuraklık hesaplamaları yapılırken bölgedeki kuraklığın fiziki olarak da değerlendirilmesi elde edilen sonuçların doğruluğunun teyit edilmesi büyük önem taşımaktadır. Ayrıca yapılan kuraklık hesaplamalarında SPI ve SPEI yöntemlerinin her ikisinden de elde edilen sonuçlar incelendiğinde çalışma alanının her iki yönüne göre de Öz [24] tarafından 2020 yılında yapılan çalışmada belirtilen sonuçlara benzer şekilde orta kurak bir bölge olduğu söylenebilir. Çelik vd. [23] 2018 yılında yaptıkları çalışmada Van ili için kuraklık trendinin artan bir trendde olduğu değerlendirilmiş ve bu çalışmada sunulan kuraklık grafiklerindeki eğilim çizgileri incelendiğinde Çelik vd. [23] tarafından 2018 yılında yapılan çalışmaya benzer şekilde kuraklık değerlerinde seçilen tüm istasyonlar için tüm zaman periyotlarında artış trendi olduğu görülmektedir. Elde edilen bu bilgiler doğrultusunda çalışma bölgesinde kuraklığın etkisinde ilerleyen yıllarda bir artış beklenebileceği değerlendirilmekte ve bölgede kuraklık için gerekli önlemlerin alınması, su kaynaklarının daha verimli kullanılması, daha efektif sulama tekniklerinin kullanılması, daha az su gereksinimi olan tarım ürünlerinin ekilmesinin teşvik edilmesi ve bölge halkının kuraklık hakkında bilinçlendirilmesi gibi önlemlerin alınması önerilmektedir.

Yazar Katkı Beyanı

Yazar 1 fikrin oluşturulması, tasarımın yapılması, literatür taraması, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, kullanılan yöntemlerin uygulanması ve sonuçların incelenmesi, yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında katkı sunmuştur.

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.

Kaynakça

- [1] D. A. Wilhite, "Drought as a Natural Hazard: Concepts and Definitions," in *Drought: A Global Assessment*, D.A. Wilhite, Ed. London, UK, Routledge, 2012, pp. 3-18.
- [2] A. G. Koutroulis, A. E. K. Vrochidou, and I. K. Tsanis, "Spatiotemporal characteristics of meteorological drought for the Island of Crete," *J. Hydrometeorol.*, vol. 12, no. 2, pp. 206–226, April 2011. DOI: 10.1175/2010JHM1252.1.
- [3] G. Rossi, "Drought mitigation measures: A comprehensive framework," in *Drought and Drought Mitigation in Europe*, J. Voght, and F. Somma, Eds.

- Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 2000, pp. 233–246.
- [4] S. Bae, S. H. Lee, S. H. Yoo, and T. Kim, "Analysis of drought intensity and trends using the modified SPEI in South Korea from 1981 to 2010," *Water*, vol. 10, no. 3, pp. 1-17, March 2018. DOI: 10.3390/w10030327.
- [5] S. S. Ojha, V. Singh, and T. Roshni, "Comparison of meteorological drought using SPI and SPEI," *Civ. Eng. J.*, vol. 7, no. 12, pp. 2130-2149, December 2021. DOI: 10.28991/cej-2021-03091783.
- [6] T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P. M. Midgley, "IPCC, 2013: Summary for Policymakers," *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.
- [7] S. M. Vicente-Serrano, "Evaluating the impact of drought using remote sensing in a Mediterranean, semi-arid region," *Natural Hazards*, vol. 40, pp. 173-208, January 2007. DOI: 10.1007/s11069-006-0009-7.
- [8] A. K. Mishra, V. P. Singh, "A review of drought concepts," *Journal of hydrology*, vol. 391, no: 1-2, pp. 202-216, September 2010. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.07.012.
- [9] M. Svoboda, D. LeComte, M. Hayes, R. Heim, K. Gleason, J. Angel, and S. Stephens, "The drought monitor," *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 83, no. 8, pp. 1181-1190, August 2002. DOI: 10.1175/1520-0477-83.8.1181.
- [10] V. Gümüş, A. Başak and N. Oruç, "Standartlaştırılmış yağış indeksi (SYİ) yöntemi ile Şanlıurfa istasyonunun kuraklık analizi," *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, vol. 1, no. 1, pp. 36-44, June 2016.
- [11] R. Niaz, M. M. Almazah, I. Hussain, J. D. P. Filho, N. Al-Ansari, S. Sh Sammen, "Assessing the probability of drought severity in a homogeneous region," *Complexity*, vol. 2022, pp. 1-8, January 2022. DOI: 10.1155/2022/3139870.
- [12] S. Gurrupu, A. Chipanshi, D. Sauchyn, and A. Howard, "Comparison of the SPI and SPEI on predicting drought conditions and streamflow in the Canadian prairies," in *Proceedings of the 28th Conference on Hydrology*, Atlanta, GA, USA: American Meteorological Society. February 2014, pp. 1-7.
- [13] S. Tirivarombo, D. Osupile, and P. Eliasson, "Drought monitoring and analysis: Standardised precipitation evapotranspiration index (SPEI) and standardised precipitation index (SPI)," *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol. 106, pp. 1-10, August 2018. DOI: 10.1016/j.pce.2018.07.001.
- [14] E. A. Hernandez, and V. Uddameri, "Standardized precipitation evaporation index (SPEI)-based drought assessment in semi-arid south Texas,"

- Environmental Earth Sciences*, vol. 71, pp. 2491-2501, 2014. DOI: 10.1007/s12665-013-2897-7.
- [15] Ü. G. Bacanlı, T. Baran, and F. Dikbaş, "Applicability of apportionment entropy as a drought index," *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, vol. 23, no. 3, pp. 232-237, 2017. DOI: 10.5505/pajes.2016.80664.
- [16] A. Abbasi, K. Khalili, J. Behmanesh, and A. Shirzad, "Drought monitoring and prediction using SPEI index and gene expression programming model in the west of Urmia Lake," *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 138, pp. 553-567, April 2019. DOI: 10.1007/s00704-019-02825-9.
- [17] Ü. G. Bacanlı, and G. N. Akşan, "Drought analysis in Mediterranean region," *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 25, no. 6, pp. 665-671, 2019. DOI: 10.5505/pajes.2019.64507.
- [18] A. Danandeh Mehr, and B. Vaheddoost, "Identification of the trends associated with the SPI and SPEI indices across Ankara, Turkey," *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 139, no. 3-4, pp. 1531-1542, 2020. DOI: 10.1007/s00704-019-03071-9.
- [19] F. Bakanoğulları, "SPEI ve SPI indeksleri kullanılarak İstanbul-Damlıca Deresi Havzasında kuraklık şiddetlerinin analizi," *Toprak Su Dergisi*, vol. 9, no. 1, pp. 1-10, March 2020. DOI: 10.21657/topraksu.566693.
- [20] C. Liu, C. Yang, Q. Yang, and J. Wang, "Spatiotemporal drought analysis by the standardized precipitation index (SPI) and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in Sichuan Province, China," *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, pp. 1-14, January 2021. DOI: 10.1038/s41598-020-80527-3.
- [21] G. Aktürk, U. Zeybekoğlu, and O. Yıldız, "SPI ve SPEI Yöntemleri ile Kuraklık Araştırması: Kırıkkale Örneği," *International Journal of Engineering Research and Development*, vol. 14, no. 2, pp. 762-776, July 2022. DOI: 10.29137/umagd.1100886.
- [22] H. Yetmen, "Van Gölü Havzası'nın kuraklık analizi," *21. Yüzyılda Eğitim ve Toplum Eğitim Bilimleri ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, vol. 2, no. 5, pp. 184-198, 2013.
- [23] M. A. Çelik, İ. Kopar, H. Bayram, "Doğu Anadolu Bölgesi'nin mevsimlik kuraklık analizi," *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, vol. 22, no. 3, pp. 1741-1761, September 2018.
- [24] A. Öz, "Farklı kuraklık indisleri kullanılarak Van gölü havzası kuraklık analizi," M.S. thesis, Dept. Civil Eng., Van Yuzuncu Yıl Univ., Van, Turrkey, 2020.
- [25] F. Erdem, R. Altun, Z. Y. Avdan, I. Atila and U. Avdan, "Drought analysis of Van Lake Basin with remote sensing and GIS technologies," *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, vol. 24, no. 3, pp. 1093-1102, December 2021.
- [26] B. Özer, Ö. Yalçın Ercoşkun, "Drought Analysis and Resilient Strategies: The Case of Lake Van Basin," *Resilience*, vol. 5, no. 2, pp. 207-230, December 2021.
- [27] Meteoroloji Genel Müdürlüğü, "Resmi İstatistikler," [Online] Available: <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=VAN#sfB>, Accessed on July 27, 2023.
- [28] T. B. McKee, N. J. Doesken, and J. Kleist, "The relationship of drought frequency and duration to time scales," in *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, vol. 17, no. 22, pp. 179-183, 1993.
- [29] J. T. Shiau, "Effects of gamma-distribution variations on SPI-based stationary and nonstationary drought analyses," *Water Resources Management*, vol. 34, pp. 2081-2095, May 2020. DOI: 10.1007/s11269-020-02548-x.
- [30] T. Raziei. "Improving the normalization procedure of the simplified standardized precipitation index (SSPI) using Box-Cox transformation," *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, vol:37 no:3, pp. 925-951, 2003.
- [31] P. Angelidis, F. Maris, N. Kotsovinos, and V. Hrissanthou, "Computation of drought index SPI with alternative distribution functions," *Water Resources Management*, vol. 26, pp. 2453-2473, April 2012. DOI: 10.1007/s11269-012-0026-0.
- [32] N. B. Guttman, "Accepting the standardized precipitation index: A calculation algorithm," *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, vol. 35, no. 2, pp. 311-322, December 1999. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1999.tb03592.x.
- [33] H. C. S. Thom, "A note on the gamma distribution," *Mon Weather Rev*, vol. 86, no. 4, pp. 117-122, April 1958. DOI: 10.1175/1520-0493(1958)086<0117:ANOTGD>2.0.CO;2.
- [34] C. A. Karavitis, S. Alexandris, D. E. Tsemelis, and G. Athanasopoulos, "Application of the standardized precipitation index (SPI) in Greece," *Water*, vol. 3, no. 3, pp. 787-805, August 2011. DOI: 10.3390/w3030787.
- [35] M. Abramowitz, and I. A. Stegun, "Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables," 10th ed. Washington, USA, National Bureau of Standards, 1964.
- [36] M. A. A. Zarch, B. Sivakumar, and A. Sharma, "Droughts in a warming climate: A global assessment of Standardized precipitation index (SPI) and Reconnaissance drought index (RDI)," *Journal of Hydrology*, vol. 526, pp. 183-195, July 2015. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.09.071.
- [37] S. M. Vicente-Serrano, S. Beguería, J. I. López-Moreno, "A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index," *Journal of Climate*, vol. 23, no. 7, pp. 1696-1718, April 2010. DOI: 10.1175/2009JCLI2909.1.
- [38] S. A. Banimahd, and D. Khalili, "Factors influencing Markov chains predictability characteristics, utilizing SPI, RDI, EDI and SPEI drought indices in different climatic zones," *Water Resources Management*, vol. 27, pp. 3911-3928, June 2013. DOI: 10.1007/s11269-013-0387-z.

- [39] C. W. Thornthwaite, "An approach toward a rational classification of climate," *Geographical Review*, vol. 38, no. 1, pp. 55-94, Jan. 1948. DOI: 10.2307/210739.
- [40] R. Wang, W. Peng, X. Liu, W. Wu, X. Chen, and S. Zhang, "Responses of water level in China's largest freshwater lake to the meteorological drought index (SPEI) in the past five decades," *Water*, vol. 10, no. 2, pp. 1-20, Feb. 2018. DOI: 10.3390/w10020137.
- [41] R. Jiang, J. Xie, H. He, J. Luo, and J. Zhu, "Use of four drought indices for evaluating drought characteristics under climate change in Shaanxi, China: 1951–2012," *Natural Hazards*, vol. 75, pp. 2885-2903, Feb. 2015. DOI: 10.1007/s11069-014-1468-x.
- [42] M. I. Ahmad, C. D. Sinclair, and A. Werritty, "Log-logistic flood frequency analysis," *Journal of Hydrology*, vol. 98, no. 3-4, pp. 205-224, August 1988. DOI: 10.1029/WR024i008p01323.
- [43] V. P. Singh, H. Guo, F. X. Yu, "Parameter estimation for 3-parameter log-logistic distribution (LLD3) by Pome," *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, vol. 7, pp. 163-177, September 1993. DOI: 10.1007/BF01585596.



Experimental study on the aeration performance of water jet which is performed by a venturi device

Şermin KOÇYİĞİT^{1*}, Muhammet Emin EMİROĞLU²

¹ Dicle University Construction Technology Department, serminkocyigit01@gmail.com, Orcid No: 0000-0002-7283-8967

² Firat University, Civil Engineering Department, memiroglu@firat.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-3603-0274

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2 November 2023

Received in revised form 22 November 2023

Accepted 24 November 2023

Available online 29 March 2024

Keywords:

Water jet, venturi, aeration, oxygen transfer, nozzle

Doi: 10.24012/dumf.1385014

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

The purpose of aeration in water is to transfer or remove gases from the water. Dissolved oxygen is critical for living life. In water engineering, aeration and oxygen transfer using water jets are common. In this study, various venturi nozzles with air holes in the throat portion were manufactured and meaningful experiments were conducted to determine their oxygen transfer efficiency and aeration performance. The venturi nozzles with throat diameters 14, 17 and 20 mm were used in the experimental study. The ratio of the diameter of the air holes to the diameter of the throat portion is taken as 0.1, 0.2 and 0.3. Different experiments were carried out for nine different hole diameters. In addition, the ratio of the throat portion length to the throat portion diameter was taken as 1.00 and 0.50. For all nozzles, the ratio of outlet length to outlet diameter was taken as 1 and 2. In addition, comprehensive experiments were carried out for a venturi, considering the ratio of outlet length to outlet diameter as 1, 2, 3, 4 and 5. The experiments were also conducted for the circular nozzle to make comparisons. In this study, venturi nozzles gave better results than circular nozzles, and higher aeration performance values were obtained for the ratios 0.2 and 0.3, 1, 0.50 and 0.50. It was found that the aeration performance of the venturi nozzle was approximately 6.5 times higher than the air entrainment rate performance of the circular nozzle and 2.5 times higher in terms of oxygen transfer.

Introduction

One of the important parameters in terms of water quality is dissolved oxygen concentration. Oxygen is used in many biological activities and chemical reactions occurring in water. Thus, the dissolved oxygen concentration in the water tends to decrease. The process of replacing this decreasing amount is made possible by oxygen transfer, in other words, by taking oxygen from the atmosphere and returning it to water. Aeration of water is needed in the removal of volatile organic compounds in water, in cases where oxygen is required to be supplied to the system in case of decreased dissolved oxygen concentration in ponds, reservoirs or rivers, in the removal of gases that cause bad taste and odour in water, in the removal of carbon dioxide dissolved in water, in cases such as supplying oxygen to the system in biological treatment [1, 2].

There are different aeration systems. Unlike conventional aerators known as mechanical aerators and compressed air diffusers in ventilation units, water jet aeration systems are also commonly used [1, 2]. There is no need for an air compressor in the aeration system with water jet. Water jets

are easy to operate and require very little maintenance. They also ensure a good mixing in the receiving pool [1, 3, 4].

Free water jets are impinged in a perpendicular or angled manner to the water surface. Thus, it is ensured that the air in the atmosphere is transferred into the water by entraining the air bubbles with water. It is possible to see this phenomenon in free-falling structures in nature (such as streams flowing in mountainous regions, cascades, waterfalls). In addition, such phenomena are also encountered in dam spillways, weir flows and sluice outlet structures. In many hydraulic structures such as stepped spillways, energy dissipation is realised while aeration can also be performed at the same time. Water jets are used in aeration (removal of gases such as carbon dioxide, hydrogen sulphide, methane dissolved in water), flotation, oxygen transfer, waste water treatment, as well as metal cutting, metal cooling, marble cutting.

In natural phenomena, water jets play an important role in the entrainment of air, the transmission and distribution of entrained air in the form of air bubbles in the water body,

and the provision of an effective air-water contact surface. In practical applications, jet aerators are used in chemical engineering to improve mixing processes and gas-liquid transfer, and in environmental engineering for drinking water treatment plants and where oxygen transfer is required [1-4].

Canepa and Hager [5] investigated the effect of air mixing when examining scour from water jets. They stated that the more air bubbles are mixed into the downstream pool with the water jet, the less the scour depth decreases. Emiroglu and Baylar [6] opened air holes close to the exit point of the classical circular nozzle and experimentally investigated the effect of this on aeration efficiency (i.e., air entrainment rate). The holes created negative pressure and changed in the impact point the shape of the jet. In this way, more air bubbles were entrained into the receiving pool. They found that the nozzle with holes on it has more aeration efficiency than the nozzle without air holes. Emiroglu and Baylar [7] investigated the aeration efficiency of the venturi nozzle. They drilled longitudinal holes at different points of the venturi nozzle and analysed their effects. These holes are drilled both in the throat portion and in the diverging cone and converging cone zones. As a result of the experiments, it was found that more aeration efficiency was obtained in case of a hole in the throat portion. Baylar and Emiroglu [8] conducted a series of experiments for a venturi nozzle with air holes in the throat portion. In this way, they determined that the shape of the jet changed. In this case, they determined that much more aeration efficiency was obtained. Out et. al. [9] conducted a number of physical experiments using a single-hole, elevated bucket to generate a stream that falls into the receiving pool. The main variables, hydraulic flow, hole diameter and height of drop were varied in an applied area. A video was shot to examine the bubble penetration depth. Regression equations were developed to predict bubble penetration depth and statistical variation. The standard deviation regression equation can be used to estimate the statistical variation of the bubble penetration depth. The bubble penetration depth decreased with increasing height of drop and remained constant at a height of drop of 50 cm. Penetration depth increased with increasing hole diameter for all height of drop and hydraulic flows. Yamagiwa et. al. [10] investigated the effect of nozzle contraction angle on the air entrainment rate of a vertical liquid jet. Jet surface roughness increases with increasing nozzle contraction angle up to 40°. The volumetric air entrainment rate increases according to $\sin\theta=0.21$, similar to the increase in jet surface roughness. For each power consumption, air entrainment rate and nozzle contraction angle were also analysed. They stated that the power efficiency of air entrainment was almost independent of the nozzle shrinkage angle. Bin [11] gave a comprehensive review of the possible results of existing experimental and theoretical studies on gas entrainment in liquid jets. The author gave detailed presentations on bubble propagation characteristics such as bubble volume, bubble penetration depth, bubble settling time, gas retention; mechanisms; initial conditions of gas entrainment; amount of entrained gas and mass transfer. In his article, he made a compilation of all articles on the subject. His work has been

cited in over 50 references. Practical applications of jet aeration in the waste treatment, fermentation and flotation industries and their aeration performance in comparison with known conventional aeration systems are also included.

Kusabiraki et. al. [12] experimentally investigated the interactions in the air entrainment rate (Q_A) when the nozzle length to diameter ratio (L/D) takes different values for an inclined jet aeration system using low viscosity fluid. The changes in Q_A were related to the pre-impact jet shape and the propagation of the liquid velocity at the point of gas dispersion. An empirical equation was presented to predict the penetration depth of the air bubble entrained by the jet propagation. The behaviour of bubble entrainment was also reviewed in terms of the volume of the entrained bubble and the rate distribution of the impacting liquid. Sene [13] conducted a series of theoretical and experimental studies on the mechanism of water jets. Taking into account the work of other authors, he suggested that the air entrainment mechanism undergoes a qualitative change with increasing jet impact rate (U_i). Different models of air entrainment rates (Q_A) in low and high rate systems are presented and it is seen that both theoretical and experimental results give values of $Q_A \sim U_i^3$ at low rate and $Q_A \sim U_i^{3/2}$ at high rate. Quantitative predictions of Q_A in high-rate jets were consistent with experimental results. Van de Sande and Smith [14] presented a theory of aeration caused by the impact of a high rate water jet on the water surface. Experimental study provided a more satisfactory compliance than theory developed over a wide area. The boundary conditions of the theory have a physical meaning. The jet must submit to the air friction coefficient ($W_e > 10$) and the accompanying air boundary layer must be laminar ($Re_L < 5 \times 10^5$). In the case of a turbulent boundary layer, the same type of analyses can be used, but only if reliable solutions suitable for that layer cannot be found. Zhang and Zhu [15] experimentally investigated the trajectories of bubbling jets in cross flow by vertically injecting air-water mixtures through a circular nozzle. Based on dimensional analysis, they developed a semi-empirical relationship to predict the separation height of bubbly jets with strong initial momentum. The centreline trajectories of both water and air phases of the bubble jets were investigated. They observed that it decreased significantly after the separation of bubbles from water jets. Khound et. al. [16] investigated the aeration efficiency of the venturi device. The authors stated that the aeration performance of the venturi device was very high. Shukla et. al [17] made a review study about the aeration process of water using water jets. The authors found that water jets had a good performance in aeration and oxygen transfer of water and wastewater treatment plants. Yadav et al. [18] conducted an experimental study on the design of venturi aeration systems. Puri et al. [19] made a review article on the use of venturi ducts, venturi nozzles, weirs, cut-and-cover areas in aeration and oxygen transfer. In their study, the authors evaluated the aeration performance of such hydraulic structures by using artificial intelligence techniques. Dange and Warkhedkar [20] conducted an experimental study to determine the efficiency of venturi aeration systems. In this study,

standard oxygen transfer efficiency (SOTR), standard aeration efficiency (SAE), volumetric oxygen transfer coefficient of the venturi system ($K_L a_{20}$) parameters was analysed in detail. In conclusion, the authors emphasised that the venturi device was a very suitable weight for aeration. Yadav and Roy [21]; Reda Hamed [22]; Ochoa [23] also investigated the aeration efficiency of the venturi device.

The aeration performance of the venturi device was analysed in detail according to d/D (the ratio of the diameter of the throat portion to the outlet diameter), ℓ/d (the ratio of the length of the throat portion to the diameter of the throat portion), h_a/d (the ratio of the diameter of the air hole opened in the throat portion to the diameter of the throat portion) and L/D (the ratio of the length of the outlet section to the outlet diameter) in order to obtain design criteria different from the literature. In the studies in the literature, circular cross-section nozzles are mostly used as water jet nozzles. The length of the throat area of the venturi device, the variation of the length of the outlet part, the variation of the diameter of the hole opened in the throat portion and thus their aeration efficiency was investigated.

Theoretical Information

Gas transfer in water is carried out for different purposes. Air entrainment rate and oxygen transfer are carried out in order to add chlorine to the water, to increase the dissolved oxygen concentration or to remove gases such as carbon dioxide and hydrogen sulphide from the water. The solubility of a gas in water depends on the type of gas, pressure, temperature of water and concentration of pollutants in water. Gas transfer occurs at the interface between the liquid and gas phases. This transfer process continues until equilibrium is achieved between the liquid and the gas. When equilibrium is achieved, the gas concentration in the liquid reaches saturation [1-4].

$$\frac{dC}{dt} = K_L \frac{A}{V_w} (C_s - C) \quad (1)$$

where; $C_s = P_a/H$ and is the saturation concentration of oxygen in water. The term A/V_w is often replaced by "a", which indicates the specific interface surface.

If $C=C_0$ and $C=C$ in Equation (1) are integrated for $t=0$ and $t=t$, it is

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{C_s - C} = (K_L a) \int_0^t dt \quad (2)$$

From the solution of this equation;

$$\ln\left(\frac{C_s - C_t}{C_s - C_0}\right) = -(K_L a)t \quad (3)$$

is obtained. Where; C_0 and C_t = oxygen concentrations of water at the beginning and at time t , $K_L a$ = mass transfer coefficient. According to Equation (3), the values of $K_L a$ are

obtained by using t time against $-\ln\left(\frac{C_s - C_t}{C_s - C_0}\right)$ on a semi-logarithmic paper. $K_L a$ is normalised at 20 °C for comparison in different systems.

$$(K_L a)_{20} = (K_L a)_T (1.024)^{(20-T)} \quad (4)$$

Oxygen transfer efficiency is defined as the ability of the structure to provide oxygen to reach the saturation concentration of water, i.e., the performance of the aeration device. The greater the oxygen transfer efficiency, the higher the efficiency of the aeration. In other words, the higher the aeration efficiency of the system, the higher the oxygen transfer efficiency. Oxygen transfer efficiency is calculated by the following equation [1-4].

$$OE = \frac{OR V_w}{N_j} \quad (5)$$

$$OR = (K_L a)_{20} C_s^* \quad (6)$$

$$N_j = \frac{1}{2} \rho Q_w V_j^2 \quad (7)$$

where; OE is the oxygen transfer efficiency (kgO₂/kw-hour), oxygen transfer rate at 20°C and 1 atm pressure (mg/ℓ/hour), N_j is the net power of the jet (W), V_w is the water volume (m³), C_s^* is the saturation concentration of dissolved oxygen (mg/ℓ), Q_w is the water flow rate (m³/s), ρ is the mass density of water (kg/m³), V_j is the jet velocity (m/s).

Materials and Method

Tap water was used in all experiments. Each experiment started by filling the tank with tap water. Sodium sulphite (Na₂SO₃) and cobalt chloride (CoCl₂) were added to tap water to reduce the DO concentration to 0 mg/L. 1.185 m³ of water was used in the experiments. To reduce the DO concentration of this water to 0 mg/L, about 110 g Na₂SO₃ was added and 3 g CoCl₂ was added as a catalyst.

This study was conducted in the Hydraulic Laboratory of the Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Firat University. The schematic view of the experimental set is given in Fig. 1. The experimental setup consisted of a water tank, water pump, flowmeter, thermometer, dissolved oxygen (DO) meter, DO probe, venturi device, anemometer, air trap, relief valve and ruler. All experiments were carried out in a water tank made of sheet metal and glass with a volume of 1.80 m³ (0.75 m width, 2.0 m length, and 1.2 m height). The water was circulated by means of a water pump. The water velocity in the venturi device was calculated by considering the diameter at the inlet of the venturi. In circular nozzles, it was calculated by considering the outlet diameter. The discharge of the system was determined using a flowmeter. The venturi device used in the experiments was manufactured using a plastic, transparent material. The diameters of the air holes in the venturi device were taken as 1.4, 1.7, 2.0, 2.8, 3.4, 4.0, 4.2, 5.1, and 6.0 in mm.

The residence time of air bubbles transported to the water is an important parameter in terms of oxygen transfer efficiency. The residence time is related to the penetration depth (D_p), which is the vertical distance from the water surface to the bubble flow path and hence the bubble area submerged to the bottom of the water. Below the point where the jet contacts the water, two different bubble areas are formed. It can be expressed as an inner cone of high turbulence where the bubble spreads freely and an outer area where larger bubbles rise out of the cone and rise towards the water surface. The tank depth was therefore designed so that it was not to affect the penetration depth.

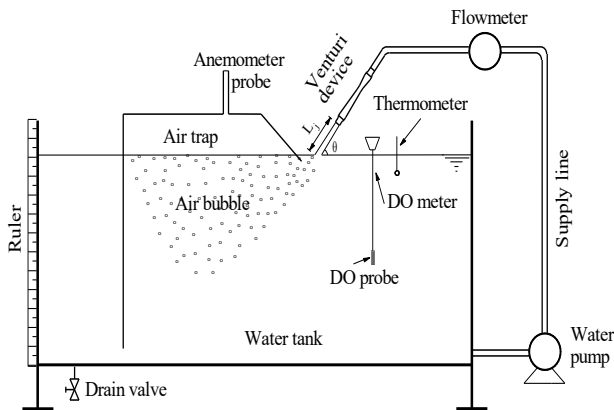


Fig. 1. Schematic view of the experimental setup

In this study, an air trap with dimensions (0.70 m × 0.85 m × 1.10 m) with an anemometer placed on its surface was used to measure the air flow rate (Fig. 2). This trap was an effective tool for measuring Q_A value. DO concentrations were measured using a HANNA Model HI9142 adjustable, portable oxygen meter shown in Fig. 3(a). The DO metre was calibrated daily before use. The adjustment methods were carried out as recommended by the manufacturer. The calibration was performed in humid air under the current weather conditions. Air entrainment rate (Q_A) was measured using a Testo 435 model anemometer shown in Fig. 3(b).

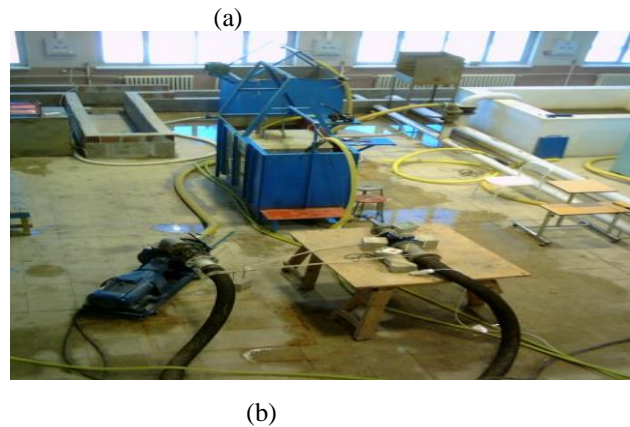
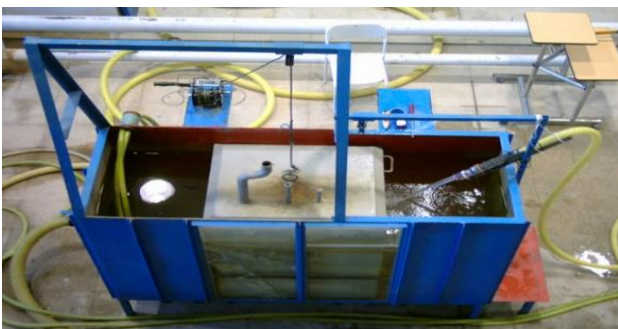


Fig. 2. (a) Top view of the experimental set, (b) Water tank and trap

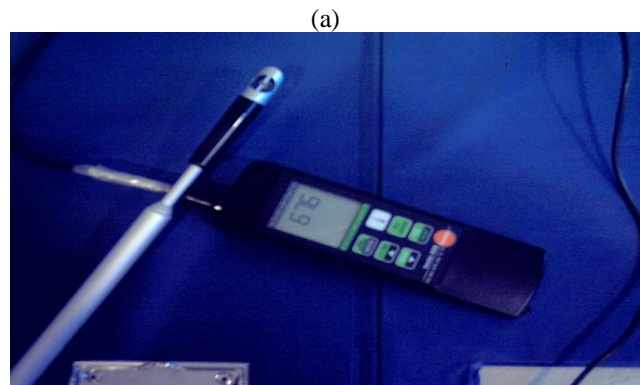


Fig. 3. Appearance of a) oxygen meter b) anemometer used in the experiments

In this study, the nozzles given in Fig. 4 and Fig. 5 were manufactured and used. Each nozzle was tested at jet velocity (V_j) values ranging from 2.50 m/s to 15.00 m/s. These velocity values belong to the part where the feeding line ends and the nozzle starts. These values were used when calculating $Re \left(= \frac{V_j \times D}{\nu} \right)$ values. Where, V_j is the jet velocity, D = diameter and ν is the kinematic viscosity of water. The water jet length (L_j) from the nozzle exit of the jet on the water surface to the impact point was taken as 0.30 m. The angle of impact was 45° for air entrainment and OE experiments. Air holes were drilled in the throat portion of the venturi device. Baylar and Emiroglu [9] found that the holes drilled in the throat portion had the best aeration efficiency in their study. Therefore, in this study, the holes

on the venturi device were drilled in the throat portion. Since Baylar and Emiroglu [8] gave the best angle values for aeration as 21° and 7° in their study, it was taken as $\alpha_1=21^\circ$ and $\alpha_2=7^\circ$.

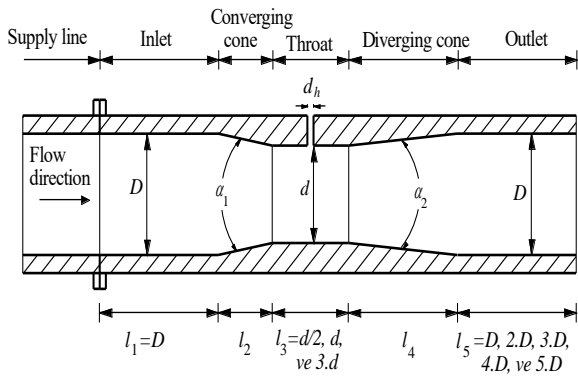


Fig. 4. Details of the venturi nozzle type used in the experiments

$$\text{where } \ell_2 = \frac{D-d}{2 \operatorname{tg}(\alpha_1)} ; \ell_4 = \frac{D-d}{2 \operatorname{tg}(\alpha_2)}$$

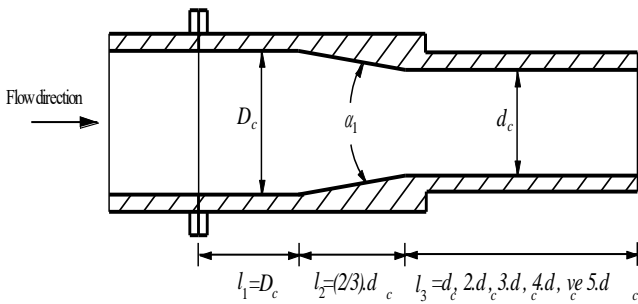


Fig. 5. Details of the circular nozzle type used in the experiments

$$\text{where } \ell_2 = \frac{D-d}{2 \operatorname{tg}(\alpha_1)}$$

The features of the venturi nozzles and circular nozzles used in this study are as follows: Venturi nozzles with $d=14$ mm, $d=17$ mm, $d=20$ mm throat portion diameter was used. In jet expansion, air entrainment rate and penetration depth experiments, the ratio of throat portion diameter to nozzle diameter was taken as $d/D=0.50$ and $d/D=0.75$. The ratio of the diameter of the air holes to the diameter of the throat portion was taken as $h_d/d=0.1$, $h_d/d=0.2$ and $h_d/d=0.3$. In addition, $\ell/d=1.00$ and $\ell/d=0.50$ were taken. In addition, $L/D=1$ and $L/D=2$ were evaluated for all nozzles. In order to compare the effect of different outlet lengths on jet expansion, air entrainment rate and penetration depth Only for the venturi nozzle with $d=17$ mm, step by step experiments were carried out between 5, 4, 3, 2 and 1 varying values of L/D for $d/D=0.50$, $\ell/d=3$ and $h_d/d=0.2$ and the results were evaluated. For the venturi nozzle with $d=17$ mm, $L/D=1$, $d/D=0.50$ and $\ell/d=0.50$ while $h_d/d=0.4$ and $h_d/d=0.5$ values were also taken and the data obtained as a result of this situation were evaluated; In addition, with these variables, the amount of air entrained by the holes was

measured by immersing the jet in water. In oxygen transfer efficiency experiments, it was taken as $L/D=2$, $d/D=0.50$ and $d/D=0.75$, $\ell/d=1.00$ and $\ell/d=0.50$, $h_d/d=0.2$. Again, in order to make some comparisons while performing OE experiments $L/D=1, 2, 3, 4$ and 5 values were considered for $L/D=1, 2, 3, 4$ and 5 for $L/D=1$, $d/D=0.50$ and $\ell/d=1.00$ for $d=17$ mm nozzle; $L/D=1$, $d/D=0.50$ and $\ell/d=1.00$ for $d=20$ mm nozzle and $d/D=0.50$ and $\ell/d=3.00$ for $d=17$ mm nozzle.

In circular nozzles, nozzle diameters of $D=18.67$ mm, 22.67 mm, 26.67 mm, 28 mm, 34 mm, and 40 mm were taken to be the same with the outlet diameters of venturi nozzles. In all experiments with circular nozzles, it was taken as $L/D=1$ and $L/D=2$. In order to make some comparisons with these mouthpieces, in the OE experiments, For $D=34$ mm, $L/D=1, 2, 3, 4$ and 5 values were taken and in the jet expansion, air entrainment rate and penetration depth experiments, $L/D=5$ value for $D=34$ mm was taken.

In this study, a series of laboratory experiments were conducted with a perforated venturi nozzle and a circular nozzle to determine the variation of the air entrainment rate and oxygen transfer efficiency in the third portion. The reason for experimenting with circular nozzle was to make a comparison. A vacuum (air suction-negative pressure) is created in the air holes of the venturi device. If a minimum differential pressure (ΔP) occurs between the inside and outside of the venturi device, this is a success. When a pressurised liquid, such as water, enters the venturi device, it is squeezed into the throat of the venturi device and transformed into a high-speed jet flow. As a result of the differential pressure, the increase in the rate in the throat portion of the venturi device leads to a decrease in the pressure in the throat portion. This pressure drop allows air to enter through the holes. As the jet stream propagates outside the venturi device, its rate decreases and is converted into pressure energy at a pressure level lower than the internal pressure of the venturi device. Venturi devices are highly efficient and require less than 20% differential to initiate suction.

A trap and an anemometer were used to determine the air entrainment rate. The flow rate of the air coming out of the pipe at a sufficient height above the trap was measured for about 60 s and averaged. With the measurement made in this way, reliable results were obtained than the measurements made with the air flowmeter. For this reason, an anemometer was used in this study instead of an air flowmeter. Jet expansions were measured at the point of impact in the receiving using callipers.

Penetration depths were determined with the help of a ruler placed on the tank and photographed. The water was then circulated to 100% saturation. Taking t on the x -axis and $-\ln\left(\frac{C_s - C_t}{C_s - C_o}\right)$ on the y -axis, the line was fitted using the least squares method according to these two parameters and thus ($K_L a$) values were obtained.

Findings and Discussion

Oxygen Transfer Efficiency of Venturi Device

In Fig. 6, a series of experiments were carried out to investigate the oxygen transfer efficiency with the water jet formed by the venturi device by taking $d/D=0.50$, $\ell/d=3.0$, $D=34$ mm as constant. The variation of L/D was considered for a wide range and experiments were performed for $L/D=1, 2, 3, 4$ and 5 . As seen in Fig. 6, oxygen efficiency values also changed with the change of L/D ratio. It is clear that L/D is an important parameter. The oxygen efficiency values obtained for $L/D=1$ are higher. High values were also obtained for $L/D=2$ and $L/D=3$. This is because as the L/D ratio increases, the expansion and shape of the water jet changes. When $L/D=1$, it is observed that the shape of the water jet hitting the water surface is crescent-shaped and the perimeter length of the jet is higher than the others. The longer the perimeter of the jet, the more air bubbles are transported to the receiving pool and thus more OE values are obtained. A decrease in oxygen transfer efficiency was observed with increasing rate. This is due to the increase in jet net power N_j . Oxygen transfer efficiency increased with the growth of diameter. This is due to the increase in jet momentum. In addition, OE values obtained with circular nozzle were lower for all L/D values. The OE values obtained with the Venturi device are about 2.5 times higher than those obtained with the circular nozzle.

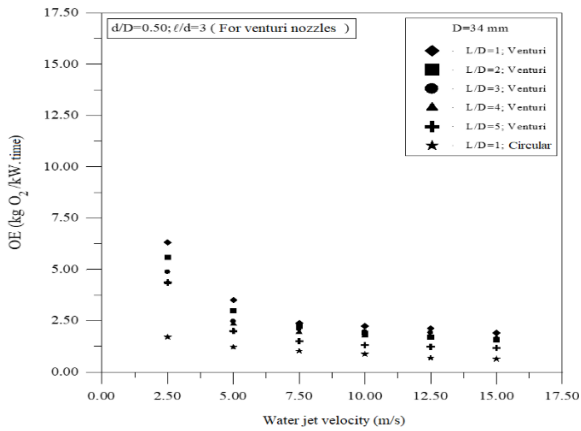


Fig. 6. Variation of L/D in venturi nozzles with oxygen transfer efficiency depending on the water jet velocity

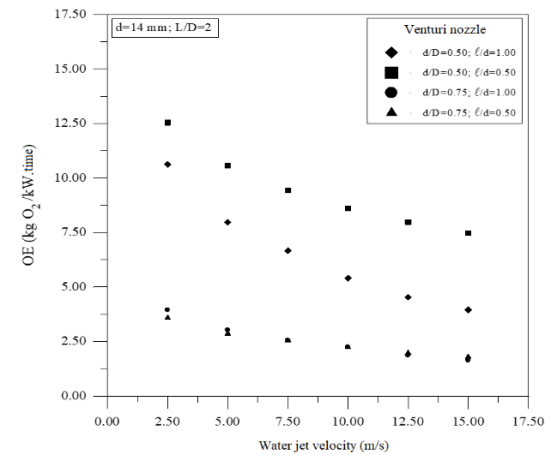
In Fig. 7, $L/D=2$ was taken as constant and a series of experiments were carried out to examine the oxygen transfer efficiency with the water jet formed by the venturi device to see the effect of ℓ/d and d/D for $d=14, 17$ and 20 mm. It was taken as $\ell/d=0.50$ and 1.00 and $d/D=0.50$ and 0.75 . It is also seen from the figure that the values of $d/D=0.50$ are considerably higher than $d/D=0.75$. Also, the best OE values were obtained when it was $\ell/d=0.50$. Figure 7(a) shows the OE values for $\ell/d=1.00$ and Fig. 7(b) shows the OE values for $\ell/d=0.50$ for different diameters. An increase in OE values was also observed with the increase in the diameter in the throat area. It can be seen from the figures that the OE values of $d/D=0.50$ are much higher than

the OE values of $d/D=0.75$ for all tested cases. While comparing the venturi nozzle with the circular nozzle, the values of $D=40$ mm, which has the best OE value of the circular nozzle, are shown in this graph. It is seen that there is a big difference between the OE values of the venturi nozzle and the OE values of the circular nozzle.

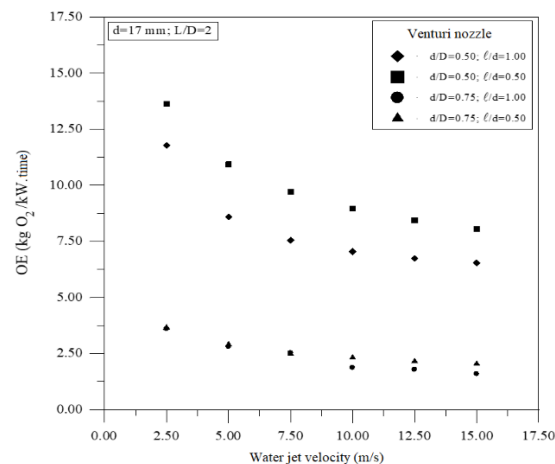
Van de Sande and Smith [12] presented the oxygen transfer efficiencies of 3.9, 5.8, 8, 10, 12 mm circular nozzles. The maximum velocity was taken as 15 m/s. $K_L a$ values increased with increasing rate. The slope of the obtained graph is consistent with the slopes of the values obtained in this master's study. In the study by Van de Sande and Smith [12], a graph was drawn between jet velocity and OE and OE values decreased with increasing velocity. Graphs in the same trend were obtained in this study. Bin [11], proposed the following equation:

$$OE = 2.07 \times N_j^{-0.23} \times D^{0.1} \times L_j^{0.5} \tag{8}$$

where; $N_j=(kW)$, $OE=(kgO_2kW^{-1}h^{-1})$, $D=(m)$, $L_j=(m)$ The OE values given by Baylar and Emiroglu [8] are consistent with the values obtained in this study. For the circular nozzle with $D=28$ mm, $V_j=5.0$ m/s, $L_j=30$ cm and $Re=137254.9$ values; $OE=0.342$ value was obtained with Eq. (8) presented by Van de Sande and Smith and $OE=1.789$ value was obtained with Eq. (10) presented as a result of the study studies.



(a)



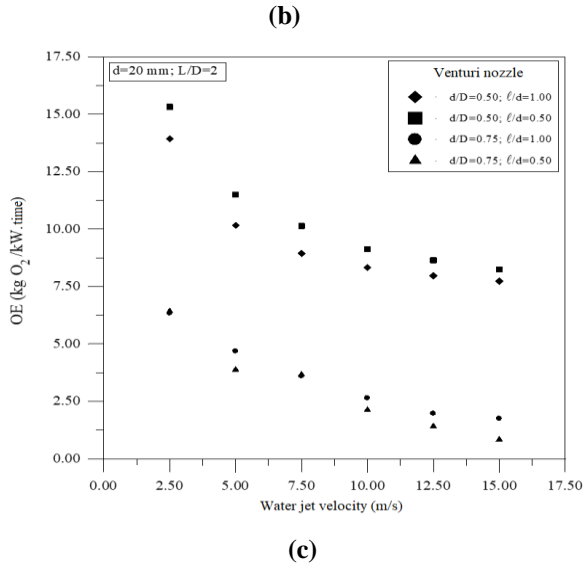


Fig. 7. Variation of d/D and l/d in venturi nozzles with oxygen transfer efficiency depending on the rate

In Fig. 8, the oxygen transfer efficiencies of the water jet created by the venturi device and the circular device are compared. As seen in Fig. 8, OE values increase with the growth in the diameter of the throat are of the venturi device. This is due to the increase in momentum. OE values decreased with the increase in d/D . This is due to the increase in the diameter in the throat portion and the decrease in the exit velocity in the venturi device. As can be seen from Fig. 8, the OE values of the circular nozzle are considerably lower than the venturi nozzle. This shows that the performance of the venturi device is very high compared to the circular nozzle.

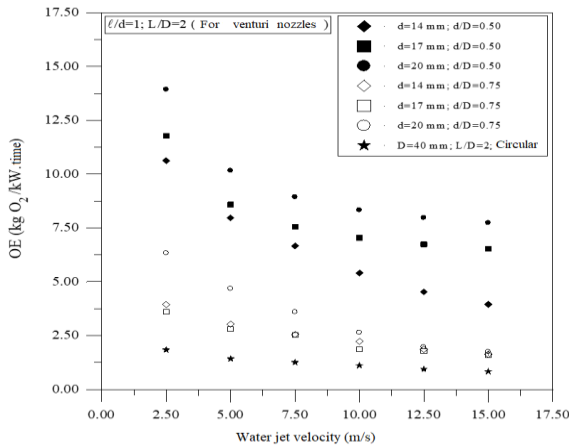


Fig. 8. Comparison of the change of D in circular nozzles, d in venturi nozzles and d/D in circular nozzles with the oxygen transfer efficiency depending on the rate

Air Entrainment Rate Performance of Venturi Device

Figure 9 shows the variation of l/d and h_d/d in venturi nozzle with air entrainment rate (Q_A) depending on water jet velocity. For venturi nozzles, the tendency of Q_A to increase with increasing water jet velocity is very high. In general, the values of $l/d = 0.50$ were higher than the air entrainment rate values of $l/d = 1.00$. The values of $h_d/d = 0.2$

and $h_d/d = 0.3$ are higher than the values of $h_d/d = 0.1$. At $d = 14$ mm, no significant differences were observed in the Q_A values measured according to the variation of l/d and h_d/d . In this case, the highest air efficiency was observed at $d = 14$ mm when $d/D = 0.50$, $L/D = 1$, $l/d = 0.50$ and $h_d/d = 0.2$

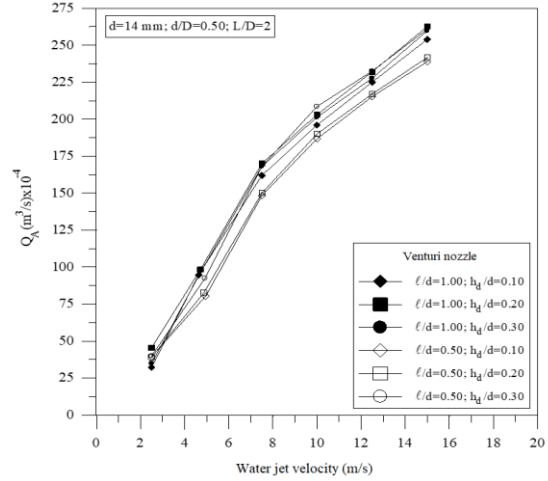


Fig. 9. Variation of l/d and h_d/d in venturi nozzle with air entrainment rate depending on the water jet velocity

Figure 10 shows the variation of d/D and h_d/d in venturi nozzle with air entrainment rate (Q_A) depending on water jet velocity. To see the variation, d , l/d and L/D were taken as constant. Q_A values decrease significantly with increasing d/D ratio. The reason for this is that the exit velocity increases with the narrowing of the throat area and the amount of air drawn from the hole in the throat area increases and the shape of the jet changes. Thus, an increase in the amount of air bubbles transferred to the receiving environment is observed.

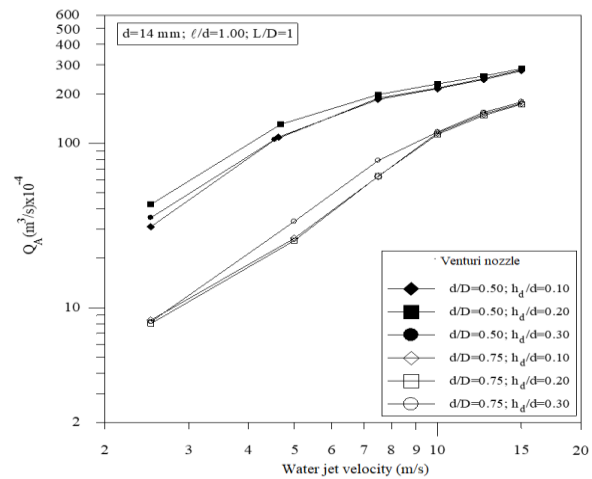


Fig. 10. Variation of d/D and h_d/d in venturi nozzle with air entrainment rate depending on the rate

Figure 11 shows l/d . As seen in Fig. 11, Q_A values decreased with increasing l/d . As mentioned above, the hole or holes in the throat area change the shape of the jet. If the length of the throat portion increases, the change in

the shape of the jet decreases. Thus, Q_A values decrease with the increase of ℓ/d .

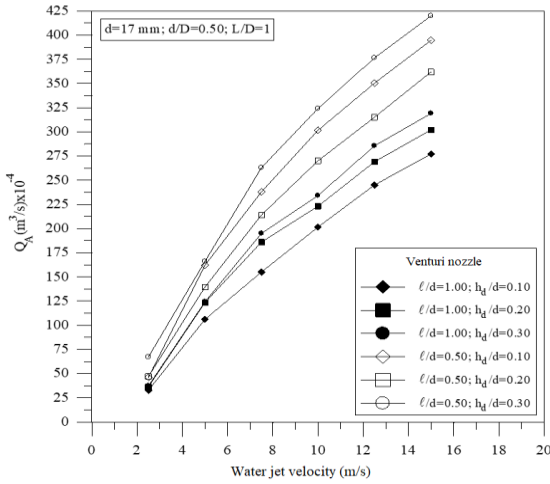


Fig. 11. Variation of ℓ/d and h_d/d in venturi nozzle with air entrainment rate depending on the water jet velocity

Figure 12 shows d/D ve h_d/d . Q_A values decrease with increasing d/D . In case of $d/D=0.50$, the change of h_d/d did not change the Q_A values much and close results were obtained. This is due to the fact that at small d/D ratios, the amount of air intake in the holes in the throat portion does not differ much due to the high velocity.

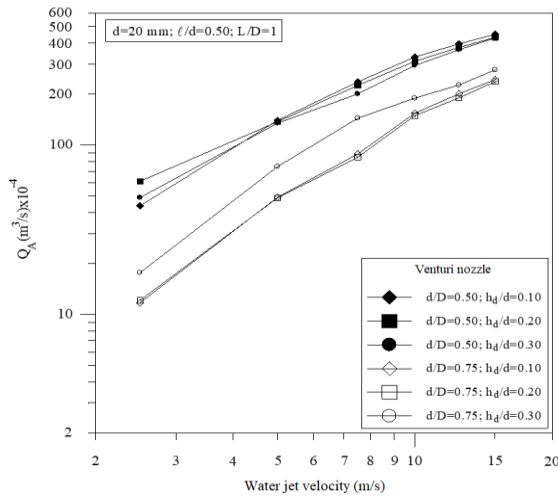


Fig. 12. Variation of d/D and h_d/d in venturi nozzle with air entrainment rate depending on the water jet velocity

In Fig. 13, the variation of Q_A for venturi nozzle is analysed for $d=14, 17$ and 20 mm, $d/D=0.50$, $\ell/d=0.5$ and 1.0 and $h_d/d=0.1$ and 0.2 and compared with circular nozzle with the same nozzle outlet diameter. Compared to the circular nozzle, the Q_A values of the venturi nozzle were observed to be considerably higher. It can be seen from the figure that the Q_A values of the venturi nozzle are approximately 6.5 times higher than the circular nozzle. In Fig. 13; the venturi nozzle was immersed in water and the amount of air drawn from different holes was measured and given in the figure. It was observed from the experiments that the air drawn by the negative pressure created by $h_d/d=0.1$ gave the lowest value. In case of $h_d/d=0.3$, the most air was drawn. The

values of $h_d/d=0.5$ were less than $h_d/d=0.4$. In other words, no direct proportionality was observed between the increase in hole diameter and the amount of air drawn. With the increase in diameter, an increase in Q_A values is also observed. This is because the momentum of the jet increases. In the study conducted by Bin [20], Q_A values increase with increasing velocity. In this paper, the results of experiments performed on very small diameters were presented. The Q_A values in the study by Baylar and Emiroglu [8] are consistent with the results of this study.

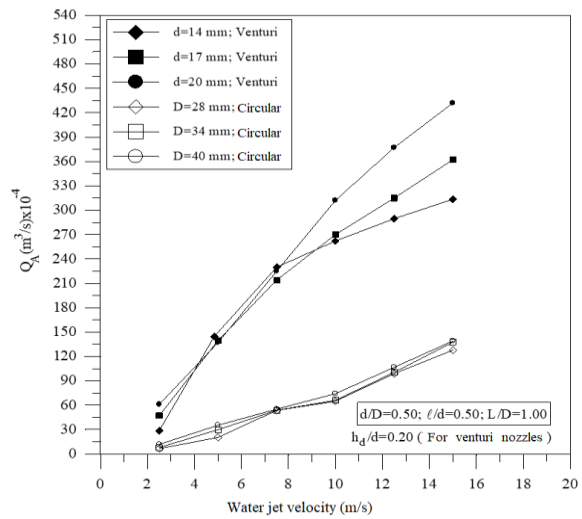
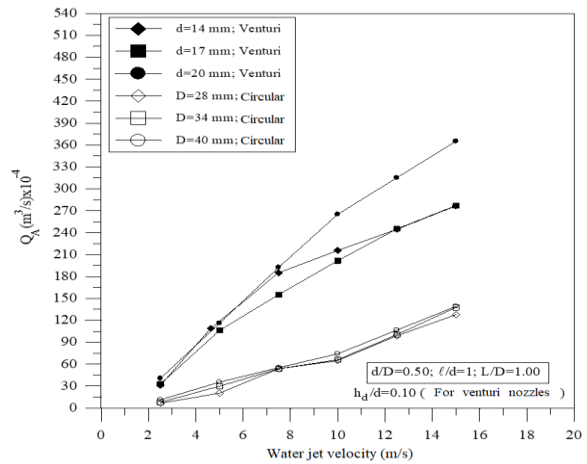


Fig. 13. Comparison of the variation of d and D in venturi and circular nozzles with air entrainment rate as a function of water jet velocity

In this study, analyses were made for air entrainment rate and oxygen transfer efficiency and their equations were developed. The analyses were performed using the least squares method. The developed equations are presented below:

$$Q_A = \left[A \times Re^B \times \left(\frac{d}{D}\right)^C \times \left(\frac{\ell}{d}\right)^{D^{\wedge}} \times \left(\frac{h_d}{d}\right)^E \right]^G \quad (R) = 0.975 \quad (9)$$

where, $A = 0.010634$, $B = 0.267650$, $C = -0.174515$, $D^{\wedge} = -0.049683$, $E = 0.014116$ ve $G = 3.594574$.

$$OE = \left(\exp \left[Re^B \times \left(\frac{d}{D} \right)^C \times \left(\frac{l}{d} \right)^{D^{\wedge}} \right] \right)^E \quad (R) = 0.942 \quad (10)$$

where, $B = -0.133437$, $C = -1.94335$, $D^{\wedge} = -0.128016$ ve $E = 2.821326$. A, B, C, D^{\wedge}, E and G : experimental constants, Re = Reynolds number (-), d = throat portion diameter (m), D = outlet diameter (m), l = throat portion length (m), h_d = diameter of the hole in the throat portion (m)

The degree of accuracy of the equations found are provided in Fig. 14 and 15. It can be seen from the figures that all the equations obtained are consistent with the measured values.

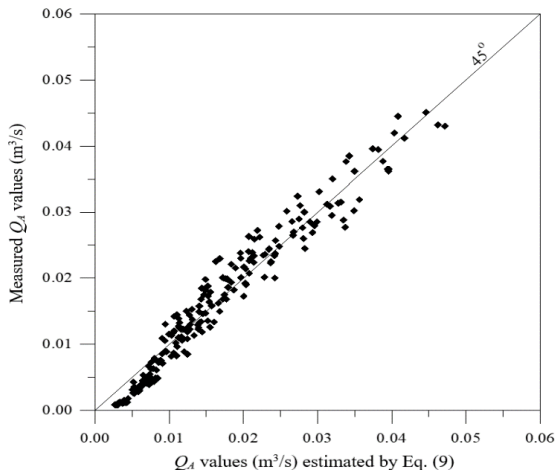


Fig. 14. Comparison of Q_A estimated by Eq. (9) with measured Q_A values

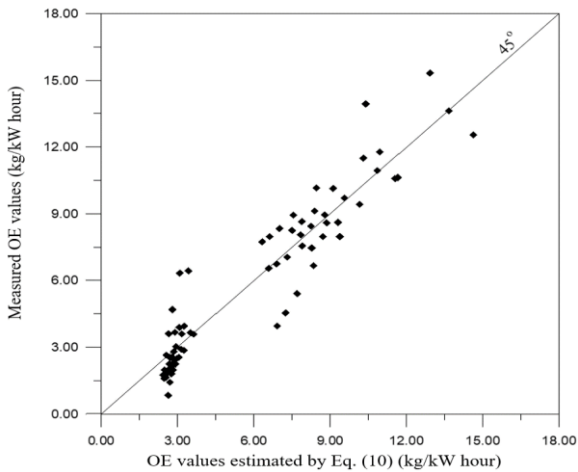


Fig. 15. Comparison of OE estimated by Eq. (10) and measured OE values

Conclusion

In this study, water jets were formed with venturi nozzles with different nozzle diameters and circular nozzles with the same outlet diameters as venturi nozzles. Significant experiments were carried out to determine the air entrainment rate and oxygen transfer efficiency of each nozzle by providing air entrainment into a water-filled tank

with these nozzles. The results obtained from this study are summarised below.

- ✓ Venturi nozzles have a higher aeration efficiency than that of circular nozzles.
- ✓ As the velocity of the water jet increases, air entrainment rate and mass transfer coefficient also increase. But oxygen transfer efficiency decreases.
- ✓ The type of nozzle is an important factor affecting the aeration performance.
- ✓ Air entrainment rate and mass transfer coefficient values of venturi nozzle are considerably higher than that of circular nozzle.
- ✓ Varying diameters of the air holes in the throat portion significantly affected air entrainment rate, jet expansion, oxygen transfer efficiency and penetration depth. No increase in air entrainment rate was observed with increasing h_d/d . Generally, higher data were obtained for $h_d/d=0.2$ and $h_d/d=0.3$.
- ✓ It was observed that the ratio of nozzle outlet length to outlet diameter has a significant effect on air entrainment rate, jet expansion, oxygen transfer efficiency and penetration depth. When the air entrainment rate values in venturi nozzle are compared for $L/D=1$, $L/D=2$ and larger values, it is observed that $L/D=1$ reaches the highest values.
- ✓ The ratio of throat portion length to throat portion diameter was effective on l/d ; air entrainment rate, jet expansion, oxygen transfer efficiency and penetration depth. $l/d = 0.50$ generally gave better results than $l/d = 1.00$.
- ✓ It was observed that the data provided by $d/D=0.50$ was significantly higher than $d/D=0.75$ for all venturi nozzles tested.
- ✓ In practice, the use of a venturi nozzle instead of a circular nozzle, which makes no difference in terms of cost, will result in approximately 6.5 times higher air entrainment rate and 2.5 times higher oxygen transfer efficiency.

Ethics committee approval and conflict of interest declaration

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

Author Contributions

Koçyiğit: This study was produced from the Master's Thesis Study of Şermin Koçyiğit. The experiments of this study were carried out by a graduate student and the supervisor.

Emiroğlu: Şermin Koçyiğit's Master's thesis supervisor.

Acknowledgement

This study was supported by Firat University Scientific Research Projects (FÜBAP) Unit with project number 898. We express our gratitude to FÜBAP.

References

- [1] Koçyiğit, Ş. (2004). *Examination of the Ventilation Performance of the Water Jet Created with the Venturi Device*. Master's Thesis, Firat University, Institute of Science and Technology, June 2004, Elazığ.
- [2] Bağatur, T., 2000, *The effect of nozzle type on ventilation performance in water jet ventilation system*, Doctoral Thesis, Firat University Institute of Science and Technology, 89 s.
- [3] Jennekens, H., 1975, *Waterstrall beluchting voor biologische waterzuiverings installaties*, H₂O, 8, 479-482.
- [4] Ohkawa, A., Kusabiraki, D., Shiokawa, Y., Sakai, N. and Fujii, M., 1986, *Flow and oxygen transfer in a plunging water system using inclined short nozzles and performance characteristics of its system in aerobic treatment of wastewater*, Biotechnol. Bioeng., 28, 1845-1856.
- [5] Canepa, S. and Hager W.H., 2003, *Effect of jet air content on plunge pool scour*, Journal of Hydraulic Engineering – ASCE, 129(5), 358-365.
- [6] Emiroglu, M.E. and Baylar, A., 2003, *Role of nozzles with air holes in air entrainment by a water jet*, Water Quality Research Journal of Canada, 38(4), 785-795.
- [7] Emiroglu, M.E. and Baylar, A., 2003, *Study of the influence of air holes along length of convergent-divergent passage of a venturi device on aeration*, Journal of Hydraulic Research, 00, 0, 1-8.
- [8] Baylar, A. and Emiroglu, M.E., 2003, *The influence of air holes at the throat portion of a venturi device on air entrainment and oxygen transfer*, Water & Maritime Engineering 156, 1-7.
- [9] Out, L., Timmons, M.B. and Vinci, B.J., 2001, *Characterizing bubble penetration from a falling stream*, Aquacultural Engineering, 24(4), 279-287.
- [10] Yamagiwa, K., Ito, A., Tajima, K., Yoshida, M. and Ohkawa, A., 2000, *Effect of nozzle contraction angle on air entrainment rate of a vertical plunging liquid jet*, Journal of Chemical Engineering of Japan, 33(5), 805-807.
- [11] Bin, A.K., 1993, *Gas entrainment by plunging liquid jets*, Chem. Eng. Sci., 48, 21, 3585-3630.
- [12] Kusabiraki, D., Murota, M., Ohno, S., Yamagiwa, K., Yasuda, M. and Ohkawa, A., 1990, *Gas entrainment rate and flow pattern in a plunging liquid jet aeration system using inclined nozzles*, Journal of Chemical Engineering of Japan, 23(6), 704-710.
- [13] Sene, K.J., 1988, *Air entrainment by plunging jets*, Chemical Engineering Science, 43, 10, 2615-2623.
- [14] Van de Sande, E. and Smith, J.M., 1973, *Surface entrainment of air by high velocity water jet*, Chemical Engineering Science, 28, 5, 1161-1168.
- [15] Zhang, W., & Zhu, D. Z. (2014). *Trajectories of air-water bubbly jets in crossflows*. Journal of Hydraulic Engineering, 140(7), 06014011.
- [16] Khound, A., Yadav, A., Sarkar, S., & Kumar, A. (2017). *Influence of throat length and flow parameters on a venturi as an aerator*. International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology, 10(6), 717-724.
- [17] Shukla, B. K., Kumar, V. R., & Goel, A. (2018). *A comprehensive review of surface jet aerators*. Pollut. Res, 37, 20-25.
- [18] Yadav, A., Kumar, A., & Sarkar, S. (2019). *Design characteristics of venturi aeration system*. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, 8(11), 63-70.
- [19] Puri, D., Sihag, P., & Thakur, M. S. (2023). *A review: Aeration efficiency of hydraulic structures in diffusing DO in water*. MethodsX, 102092.
- [20] Dange, A., & Warkhedkar, R. (2023). *An experimental study of venturi aeration system*. Materials Today: Proceedings, 72, 615-621.
- [21] Yadav, A., & Roy, S. M. (2023). *An artificial neural network-particle swarm optimization (ANN-PSO) approach to predict the aeration efficiency of venturi aeration system*. Smart Agricultural Technology, 4, 100230.
- [22] Reda Hamed, M. A. (2023). *Configuration influence in relation to fluid flow of venturi system*. Environmental Quality Management, 32(3), 203-208.
- [23] Ochoa, E. D. O., García, M. C., Padilla, N. D., & Remolina, A. M. (2022). *Design and experimental evaluation of a Venturi and Venturi-Vortex microbubble aeration system*. Heliyon, 8(10).



Dairesel ön duvar kesitli salınlı su sütunu tipi enerji dönüştürücüde verim artışı

Efficiency improvement of an oscillating water column with a cylindrical frontwall underlip

Anıl Çelik¹

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, celikani@itu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4648-451X>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 1 Aralık 2023
Revizyon 7 Şubat 2024
Kabul 14 Şubat 2024
Online 29 Mart 2024

Anahtar Kelimeler:

Salınlı su sütunu (SSS),
Dalga enerji dönüştürücü,
Verimlilik,
Güç alma yapısı,
Yumuşak geçişli geometri

ÖZ

Dalga enerji dönüştürücüler içinde salınlı su sütunu (SSS) öne çıkmaktadır. Klasik SSS yapısı ön duvar giriş ağız köşeli olup dalga akımının SSS haznesine giriş çıkışlarında akış ayrılmasına ve dolayısı ile çevrinti ve girdap oluşumuna sebebiyet vermektedir. Bu da absorbe edilen gelen dalga enerjisinin kısıtlı miktarda kalmasına sebebiyet vermektedir. Bu çalışmada SSS hazne ön duvarı giriş ağız için dairesel kesit önerilmiştir. Değişik miktarlardaki güç alma mekanizması sönümlenme seviyeleri (orifis kullanılarak simüle edilmiştir) için fiziksel deneyler icra edilmiş, hem klasik SSS yapısı hem de dairesel duvar giriş ağız ön kesitine sahip hazne verimleri hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Her bir orifis oranı (güç alma yapısı sönümlenme oranı) için dairesel kesitli ön duvar ağızına sahip olan yapının verimliliği artış göstermiştir. Maksimum verim artışı, en düşük sönümlenme (en yüksek orifis çapı) miktarı için yüzde 21.1 olarak gerçekleşmiştir. SSS hazne ön duvarı akış ayrılması sonucunda oluşacak yüksek kayma gerilmelerine de maruz kalmaktadır. Ön duvar altının dairesel kesit olması durumunda gerçekleşmeyecek veya kısıtlı oluşacak kayma gerilmeleri ile yapı ön duvarının yıpranması azaltılacak ve bu suretle SSS yapı ömrü uzayacaktır. Ayrıca SSS yapısından maksimum verim elde etmek için gerekli optimum orifis çapı oranı 0.04m olarak tespit edilmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 1 December 2023
Received in revised form 7 February 2024
Accepted 14 February 2024
Available online 29 March 2024

Keywords:

Oscillating water column (OWC),
Wave energy converter,
Efficiency,
Power-take off,
Streamlined geometry

ABSTRACT

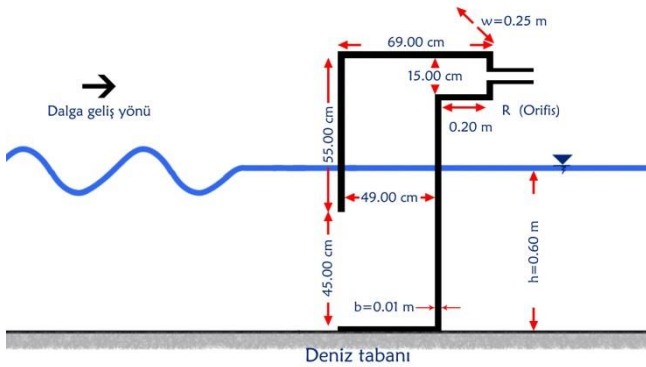
Oscillating water columns (OWC) are promising ones among wave energy converters. A conventional OWC frontwall underlip has a rectangular cross section. Therefore, during the water flow entering and exiting out of the chamber frontwall, flow separation occurs leading generation of vortex and eddies. This phenomenon indicates loss of energy and restricts the amount of wave energy extraction form incident waves. In this study, a frontwall underlip geometry with a circular cross section is suggested. Physical experiments are conducted under regular incident waves for different levels of applied power take off damping. The efficiency of both classical and newly suggested OWCs are contrasted with each other. For every incident wave and level of PTO damping, the efficiency of the OWC with cylindrical frontwall underlip cross section is found to increase. Maximum efficiency improvement is materialized as 1.211 for the lowest value of the PTO damping. Further, the cylindrical underlip shape that has been introduced is also deemed significant from a structural design perspective due to their crucial role in reducing the considerable shear stresses induced by large vortices, which the front wall of an oscillating water column (OWC) must withstand. Further, the optimum orifice diameter for maximum efficiency of the OWC is found to be 0.04m.

Doi: 10.24012/dumf.1398958

* Sorumlu Yazar

Giriş

Üçte ikisinden fazlası sularla kaplı dünyamızda, dalga enerjisi önemli bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Salımlı su sütunu (SSS) tipi dalga enerji dönüştürücü yapısı diğer dalga dönüştürücüler arasında, basit çalışma mantığı ile bir adım öne çıkmaktadır. SSS yapısı içi boş bir hazneden oluşmaktadır. Kısmi suya batırılan haznenin biri su altında olmak üzere iki açıklığı bulunmaktadır. Haznenin içinde oluşan su sütunu alt açıklık vasıtasıyla dalga etkisine maruz kalmakta ve, yukarı aşağı yönlü periyodik olarak hareket etmektedir. Su sütununun hemen üzerinde bulunan hava kütlesi de bu hareket neticesinde hazne içinde su seviyesi üstünde bulunan küçük bir açıklıktan yüksek hızlarda yapıya giriş çıkış yapmaktadır. Peşi sıra basınç ve emme etkisine haiz yüksek enerjili hava akımı önüne yerleştirilecek bir türbin ve jeneratör yardımıyla dalga enerjisinden elektrik üretmek mümkün olmaktadır. Şekil 1 bu çalışmada kullanılan tipik bir SSS yapısını göstermektedir.



Şekil 1. Deneylerde kullanılan SSS yapısı ve geometrik ölçüleri.

Okyanuslar ve denizlerdeki dalgalar yüksek miktarda yenilenebilir enerji potansiyeline sahiptir. Buna rağmen henüz ticari üretime geçmiş herhangi bir dalga enerji alma yapısı bulunmamaktadır. Bunun ana nedeni dalga enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümündeki düşük verimlilik oranlarıdır [1]. Dalga enerji dönüşümü, hidrodinamik (pinomatik), türbin, jeneratör ve dağıtım gibi farklı dönüşüm safhalarından oluşmaktadır. Hidrodinamik safha, dalga elektrik enerjisi dönüşüm zincirindeki ilk aşamayı oluşturmaktadır. Bu aşamada gelen dalga enerjisinin bir kısmı yapı içine alınmakta (bir kısmı ön duvardan geri yansımaktadır), su sütunu vasıtasıyla hava sütununa iletilmektedir. Bu safhada dönüştürülen enerji miktarı diğer aşamalara aktarılacak olan enerji miktarını da belirleyeceğinden pinomatik dönüşüm önem arz etmektedir [2].

Genel olarak yapıya gelen dalga enerjisinin tümü hava akımı kinetik enerjisine dönüştürülememekte, enerji kayıpları yaşanmaktadır. Önemli enerji kayıplarından bir tanesi yapı keskin kenarlarından dolayı oluşacak çevrinti ve girdaplardır. [3] periyodik salımlı akımda, yapı keskin kenarlarında çevrinti hareketi oluşumunu tesbit etmiştir. Deneysel çalışmalarda, [4] ileri görüntüleme teknikleri kullanarak, salımlı akımın hem ovalleştirilmiş hem de keskin köşeli yapıyla etkileşimini görüntülemiştir. Keskin

köşeli yapıdan dolayı oluşan çevrinti ve girdap hareketinin dalga enerjisi dönüşümünde elde edilen gücü sınırladığını ortaya çıkarmışlardır.

Dalganın fiziksel olarak ilk karşılaştığı yapı elemanı SSS ön hazne duvarıdır. Dalga - yapı ön duvarı etkileşimi dalga enerjisine has olup karmaşık, türbülanslı ve doğrusal olmayan bir tabiata sahiptir [5]. Gelen dalga yapı içine nüfuz ederken dalga ön duvar alt ucuyla etkileşimi sonucu çevrinti ve girdaplar oluşmakta ve bu çevrinti ve girdaplar hemen sönümlenmemekte ve dalga enerji giriş ağızını kısmi olarak bloke etmektedir [6]. Konuyla ilgili literatür taraması yapıldığında SSS yapı ön duvar altının büyük çoğunlukla köşeli olduğu görülmektedir. Bazı çalışmalar keskin köşeli yapı ön duvarı altında akış ayrılması olacağını deneylerle test etmiş [3] ve enerji kaybı yaşanacağını belirtmiştir. Bunun üzerine bazı nadir çalışmalarda keskin köşeli ön duvar altının ovalleştirilmek suretiyle enerji kayıplarının azaltılması amaçlanmıştır [4,6,7]. Lakin iyileşmeler sağlansa da bu çalışmalar istenilen neticeyi verememiştir. Mevcut çalışmada ise ilk defa yapı ön duvar giriş ağız dairesel kesitli olarak tasarlanmış ve akış ayrılmasının önüne geçip enerji kayıplarının en aza indirilmesi durumu deneysel olarak araştırılmıştır. Bu sayede yapı içine periyodik olarak giriş çıkış yapan dalga akımının enerji kayıplarından minimum etkilenmesi, oluşacak girdap ve çevrinti oluşumlarının engellenmesi veya azaltılması düşünülmüştür. Böylece yapıya gelen dalga enerjisinin daha düzenli bir akış rejimine kavuşarak hava sütununa iletilmesi öngörülmüştür.

Bu bağlamda çalışmanın hedefleri aşağıdaki şekildedir:

1. Deneysel olarak sabit bir SSS yapısının farklı özellikteki dalga karakteristikleri altında farklı güç alma yapısı seviyeleri için hazne içinde oluşacak su yüzeyinin dikey yer değiştirmesinin ve hava basıncının ölçülmesi,
2. Aynı ölçümlerin SSS yapı ön duvar alt giriş kısmının silindirik olması hali için tekrarlanması,
3. Elde edilen veriler yardımıyla SSS yapısının farklı dalgalar altındaki hidrodinamik veriminin hem klasik yapı ön duvarı hem de silindirik giriş ağızlı ön duvarı için hesaplanması,
4. Sonuçların karşılaştırılması suretiyle silindirik giriş ağızlı ön duvara sahip SSS yapısının olası verim artışının hesaplanıp yorumlanmasıdır.

Materyal ve metot

Bu çalışma kapsamındaki deneyler İstanbul Teknik Üniversitesi Hidrolik laboratuvarında bulunan 30 metre (m) uzunluğunda, 1 m genişliğinde ve 1.2 m derinliğindeki cam duvarlı dalga kanalında icra edilmiştir. Dalga kanalı servo piston tipi dalga üretici donanımı vasıtasıyla istenilen tipte düzenli ve düzensiz dalgaları üretebilmektedir. Dalga kanalının resmi Şekil 2’de verilmiştir.

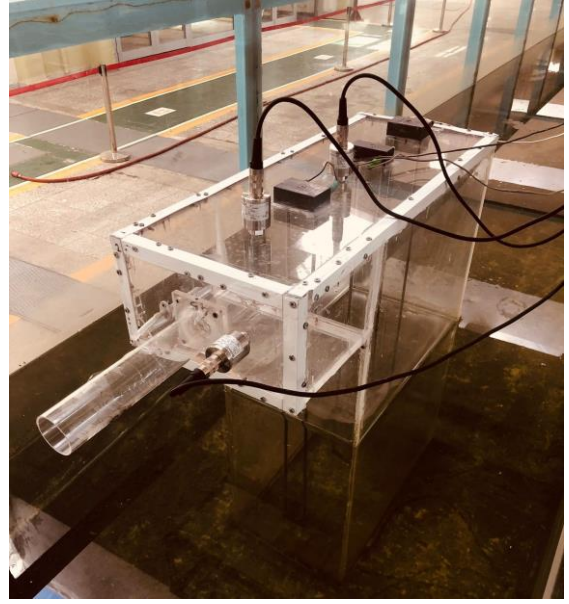


Şekil 2. Deneylerde kullanılan dalga kanalı.

Dalga kanalının sonunda gelen dalgaları sönmölemek için çeşitli ebbattaki granöler malzemeden 1:7 eğimli bir rampa yapılmıştır. Salımlı su sütunu (SSS) yapısı klasik dikdörtgen olup, sağlamlığı ve saydamlığı sebebiyle 1 cm pleksiglas malzemeden inşa edilmiştir. Yapının şekli ve ölçüleri Şekil 1 de verilmiştir. SSS yapısı dalga kanalı içine giriş ağzı dalga paletine dönük olarak, yapının ve dalga kanalının boyuna eksenleri çakışacak şekilde yerleştirilmiştir. SSS dalga paletinden uzaklığı 19.25m olacak şekilde kanal içine yerleştirilmiştir. Dalga etkisi altında hareket etmemesi için yapı işkenceler vasıtasıyla kanal demirlerine sabitlenmiştir. SSS yapısının dalga kanalı içinde olduğu bir fotoğraf Şekil 3’de verilmiştir.

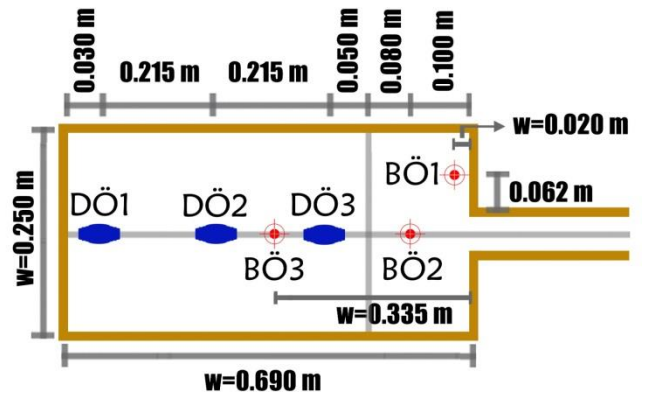
Salımlı su sütunu (SSS) yapısı ön giriş ağzı gelen dalga yönüne bakmaktadır. Dalga etkisi altında, gelen dalganın alt kısmında orbital yörünge izleyen su molekülleri dalga tepesi yapıya ulaştığında, yapı ön giriş ağzından içeriye girecektir (yapı dışındaki su seviyesi dalga tepesiyle beraber yapı içi su seviyesinden daha yüksek olmaktadır). Dalga çukuru yapıya ulaştığında ise hazne içi su seviyesi daha yüksek olmakta ve hazneden dışarı su akışı gerçekleşmektedir.

SSS yapısı uygulamaları açık deniz de, sığ denizde ve kayalıklara veya mendirek yapılarına monte edilmek suretiyle inşaa edilebilmektedir. Açık denizde uygulanması durumunda halatlarla taban zeminine sabitlenebilmektedir. Ama bu çalışma bir sığ su uygulamasına örnek teşkil etmektedir. Yapı sığ suda inşa edilecek (veya dışarıda imal edilip deniz içine montesi yapılacak) ve yapı tabanı deniz tabanına oturtulacaktır. Bu şekilde orifis tarafındaki su seviyesi yapının türbin tarafındaki (yapı arkasındaki) su seviyesine tekabül etmektedir. Yapı bu şekliyle arka kısmı kayalıklara veya mendirek kısmına yaslanmış şekilde inşa edilebilmektedir. Bu takdirde yapı arkasında orifis tarafında su bulunmayacaktır.



Şekil 3. Kanal içinde SSS yapısı.

Yapıya gelen dalgaların dalga genliği ve periyot değerlerine göre yapı içindeki su sütunu ya piston gibi yukarı aşağı yönlü hareket etmekte ya çalkantı hareketi yapmakta ya da bu iki hareket tipinin birleşimi şeklinde hareket etmektedir. SSS yapısının verimini artıran en önemli faktör hazne içi su sütununun piston hareketi yapmasıdır. Birçok gelen dalga yükseklikleri ve periyotları için SSS yapısı hazne içi su sütunu hareketleri incelenmiştir. Dalga yüksekliğinin 0.07m ve dalga periyodunun 1.8sn olması durumu için su sütununun tam bir piston hareketi yaptığı tespit edilmiş ve bu dalga parametreleri deneylerde kullanılmıştır. Gelen dalganın ölçümleri SSS yapısı kanal içinde değilken yapılmıştır. Su sütunu dikey salınım miktarı üç adet rezistans tipi dalgaölçer vasıtasıyla ölçülmüş olup, ortalamaları alınmak suretiyle ortalama su sütunu yüzeyi (SSY) değişim zaman serileri oluşturulmuştur. Dalgaölçerlerin yerleri Şekil 4’de gösterilmiştir.



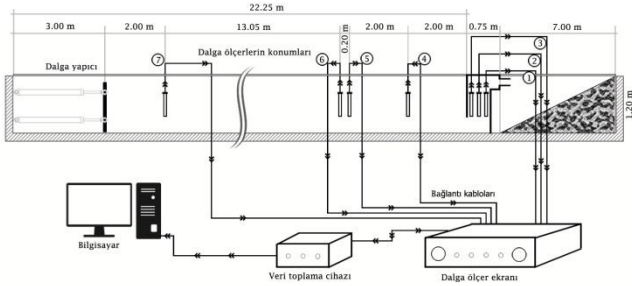
Şekil 4. SSS yapısı üstten görünüşü (DÖ: Dalga Ölçer, BÖ: Basınç Ölçer).

SSS dalga enerji dönüştürücü güç alma yapıları (ör. türbin) su sütunu salınımı etkisiyle yapı içinde hava basıncı oluşumuna sebep olarak dalga enerji dönüşümüne olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada güç alma yapısı bir orifis

vasıtasıyla simüle edilmiştir. Farklı çaptaki orifisler farklı miktarda güç alma sönümlenme miktarlarına tekabül etmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken husus orifis çapı arttıkça sönümlenme miktarı azalmakta, orifis çapı azaldıkça da sönümlenme miktarı artmaktadır. Bu çalışmada çapları 2.5 cm, 3 cm, 3.5 cm, 4 cm ve 4.5 cm olmak üzere 5 farklı orifis boyutu deneylerde kullanılmıştır. Yapı haznesinde oluşan hava basınç değerleri Keller PR41-X düşük basınç kaydediciler vasıtasıyla ölçülmüştür. Basınçölçerlerin konumları Şekil 2’de verilmiştir. Tüm ölçümler 125 Hz frekansta 64-bit veri toplama cihazıyla alınmış ve bir amplifikatör yardımıyla sinyal değerleri yükseltilmiştir. Veri toplama süresi yapı ön duvarından yansıyan dalgaların dalga paletinden geri yansiyarak deney dalgasıyla çakışmasını engellemek için 25 sn olarak belirlenmiştir. Kullanılan deney elemanları Şekil 5’te verilmiştir. Kullanılan şematik deney düzeneği Şekil 6’te gösterilmiştir.

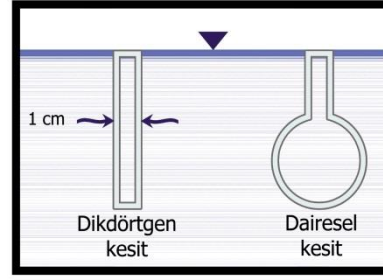


Şekil 5. Deneylerde kullanılan elektronik ölçüm cihazları.



Şekil 6. deneysel düzeneğin görünümü.

Bu çalışmada SSS yapı ön duvarı altı silindirik giriş ağız olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu sayede dalga enerji girişi esnasındaki sürtünme etkileriyle oluşacak enerji kayıplarının minimuma indirilmesi öngörülmüştür. Şekil 7’de SSS yapı ön duvarının en kesiti gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 8’de dairesel yapı giriş ağzının bir fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 7. Yapı ön duvarının klasik ve dairesel en kesiti.



Şekil 8. Dairesel yapı giriş ağzının fotoğrafı.

Linear dalga teorisine göre birim yüzey alanına düşen ortalama dalga enerjisi aşağıdaki formülle bulunabilir.

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (1)$$

Bu denklemde ρ suyun yoğunluğunu, g yerçekim ivmesini, H ise dalga yüksekliğini ifade etmektedir. Dalga enerjisi dalga grup hızında hareket ettiğinden ötürü, dalga tepesi birim genişliği için ortalama güç aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$P = E \cdot c_g \quad (2)$$

$$c_g = \frac{\omega}{k} \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \right] \quad (3)$$

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (4)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (5)$$

burada, c_g grup hızını, ω dalga frekansını, k dalga sayısını, h su derinliğini, L dalga boyunu ve T ’de dalga periyodunu göstermektedir. Küçük boyutlu model çalışmalarında SSS haznesi içindeki hava sıkıştırılamaz kabul edilmektedir [8-10]. Bu kabul çerçevesinde SSS yapısının absorbe ettiği dalga enerjisi miktarı şu formülle hesaplanabilir.

$$P_{owc} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) A_w v(t) dt \quad (6)$$

$p(t)$ and $v(t)$ anlık hava basıncı ve anlık ortalama salınımlı su yüzeyi dikey hızını göstermektedir. $v(t)$ ise dördüncü dereceden doğrulukla sayısal olarak aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$V^4_i = \frac{-d_{i+2} + 8d_{i+1} - 8d_{i-1} + d_{i-2}}{12\delta t} \quad (7)$$

Burada d_i , durgun su derinliğine göre, i anındaki ortalama su sütunu dikey yer değişmesini ve δt ise sayısal zaman adımını ifade etmektedir. SSS tipi dalga enerji dönüştürücü verimi, ξ aşağıdaki denklem ile bulunabilir.

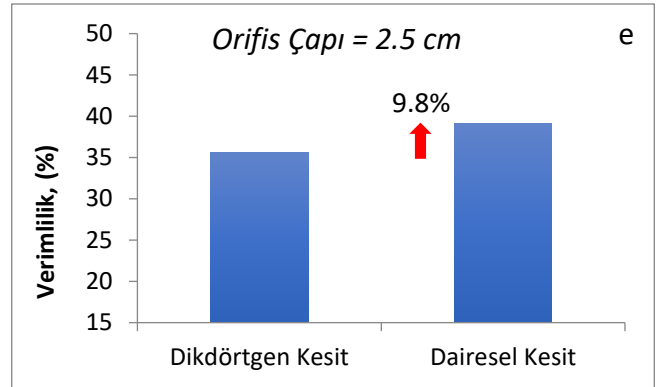
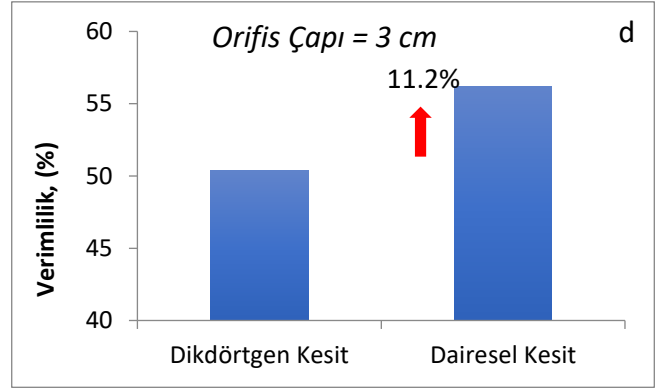
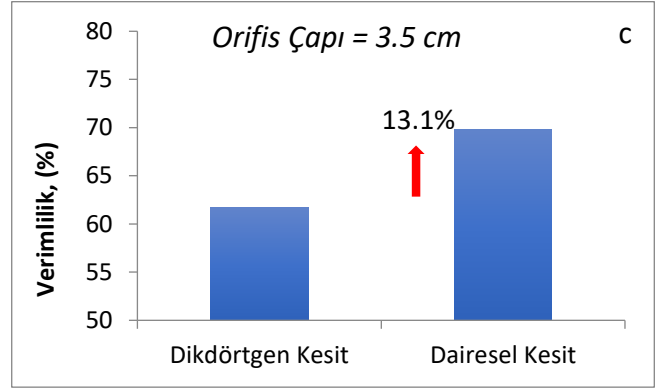
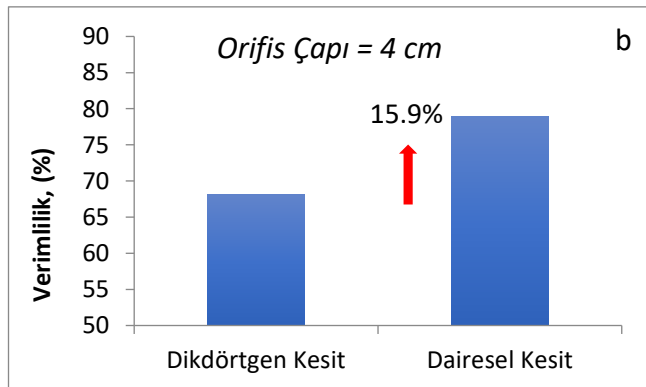
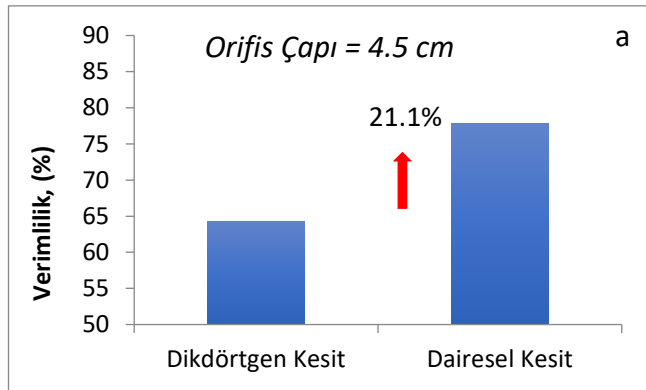
$$\xi = \frac{P_{owc}}{P_w} \quad (8)$$

w sembolü SSS yapısının genişliğidir. Bu eşitlik SSS yapısı tarafından absorbe edilen dalga gücünün yapı genişliğince gelen dalga gücüne oranını vermektedir.

Bulgular ve tartışma

Salımlı su sütunu yapısı (SSS) klasik uygulamalarında yapı ön duvar giriş ağız köşeli olarak tasarlanmaktadır. Bu tasarım biçimi hazne giriş çıkışlarında akış ayrılmasına neden olmakta ve böylece hazne ön duvarı altında çevrinti oluşumuna sebebiyet vermektedir [11]. Bu da gelen dalga enerjisinin bir kısmının zayı olmasına ve dalga enerjisi dönüşüm verimliliğinin azalmasına neden olmaktadır. Bazı çalışmalarda enerji zayıyatını önlemek için SSS hazne ön duvar altı ovalleştirilmiştir [12-13]. Fakat bu çözümün de yeterli derecede fayda sağlamadığı deneysel çalışmalarda görülmüştür [14]. Bu çalışmada ise dairesel kesitli silindirik bir yapı ağız test edilmiştir.

Dairesel kesitli ön duvar altına sahip SSS yapısının değişik orifis oranları için hesaplanan verimleri, klasik ön duvarlı yapı verimleri ile birlikte karşılaştırmalı olarak Şekil 9a-e’de verilmiştir.



Şekil 9a-e Dikdörtgen ve dairesel kesitli ön duvara sahip SSS yapısının farklı orifis oranları için hesaplanan verimleri.

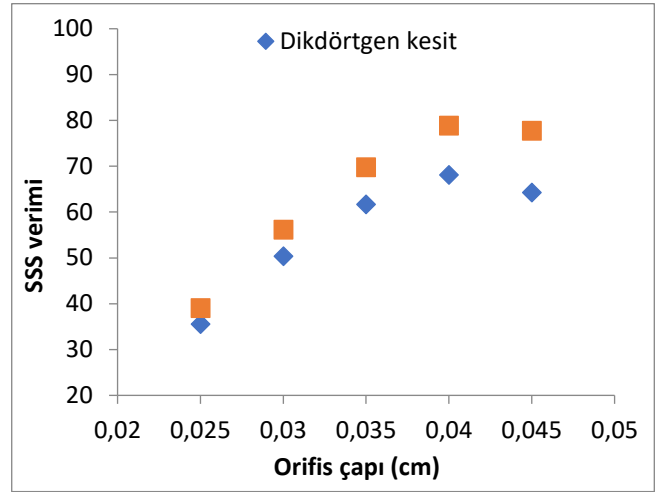
Şekil 9a-e’de anlaşılacağı üzere SSS yapı ön duvar alt ağızda dairesel kesit kullanılması tüm orifis oranları için verim artışına sebebiyet vermiştir. En büyük orifis çapı için (4.5 cm), klasik ön duvarlı yapıya kıyasla en büyük verim artışı meydana gelmiştir (Şekil 8a). Yüzde 21.1 sayısal değerine karşılık gelen artış oranı SSS haznesi ön duvarında yapılan modifikasyonun basitliği de düşünüldüğünde önem arz etmektedir. Bu artış oranıyla 0.64 olan verim değeri 0.78’e yükselmiştir. Verim artışları, diğer orifis çapları içinde, azalsa da, geçerlidir. Şöyle ki, sırasıyla 4 cm, 3.5 cm, 3 cm, 2.5 cm lik orifis çapları için verim artışları (klasik yapıya nazaran), yüzde 15.9, 13.1, 11.2 ve 9.8 olarak hesaplanmıştır. Ortalama verim artışı ise yüzde 14.22 olarak gerçekleşmiştir.

İlerleyen dalga altında akışkan parçacıkları dairesel yörüngede periyodik olarak hareket etmektedir. Klasik SSS ön duvar altından yüksek hızlarda giriş çıkış yapan akışkan ön duvarın sert köşeli geometrisinden dolayı ön duvar

altında ayrılmaya maruz kalmaktadır. Buda çevrinti ve girdap oluşumuna neden olmaktadır, böylece, dalga enerjisinin bir kısmı su sütununa iletilmemekte ve zayıf olmaktadır. Dairesel kesitli giriş ağzına sahip hazne durumunda ise akışkan ön duvar altından geçerken daha yumuşak bir geçiş geometrisi sayesinde ayrıma maruz kalmamakta veya akış ayrılması miktarı düşük olmaktadır. Ayrıca, çevrinti enerji kaybının yanı sıra oluşan girdap hemen sönmülmemekte, hareketine devam ederek yer değiştirmekte ve hazne su altı giriş ağzını kısmi olarak bloke etmektedir. Bu şekilde yapı içine giremeyen dalga enerjisi heba olmaktadır. Dairesel ön duvar giriş ağzı böylece sadece çevrinti hareketini engellemekte aynı zamanda su altı giriş alanının kısmi olarak bloke olmasına da mani olmaktadır.

Şekil 9 (b-e) den de anlaşılacağı üzere SSS dalga enerji dönüştürücü verim artışları daha düşük orifis çap değerleri (yüksek güç alma sönmüleme miktarları) içinde gerçekleşmektedir. Fakat, verim artış oranı orifis çapı azaldıkça, düşmektedir. Orifis (güç alma yapısı, ör. türbin) hazne içindeki havanın çıkışını kısıtlayarak hava basıncı oluşumuna ve böylece dalga enerjisinin dönüşümüne sebep olmaktadır. Aynı zamanda orifisin varlığı oluşturduğu hava basıncı vesilesiyle su sütunu salınım miktarları üzerinde de fiziksel baskı uygulamaktadır. Orifis çapı daha yüksek (sönmüleme düşük) olduğunda su sütunu üzerinde dalga etkisiyle oluşan hava basıncı azalmakta su sütunu daha rahat hareket etmektedir. Böylece ön duvar altından yapı içine girip çıkan akışkan hızları da artmaktadır. Böylece orifis çapı yükseldikçe akış ayrılması miktarının daha fazla olması beklenir. Bu durumda dairesele yapı ön duvar ağzının daha etkili olduğu söylenebilir. Yüzde 21.1lik verim artışı da bunu teyit etmektedir. Daha düşük orifis çaplarında su sütunu hareketleri oluşan yüksek hava basıncı dolayısıyla kısıtlanmış olmaktadır. Bu durumda su sütunu salınım miktarı azalacak ve yapı ön duvar altından hazneye giriş çıkış yapan akışkan hızları düşecektir. Bu da çevrinti oluşum miktarını azaltacaktır. Böylece, düşük orifis çaplarında (yüksek sönmüleme değerlerinde) zaten miktarca az olan enerji kayıplarını dairesele kesit daha düşük bir miktarda azaltabilecektir. Bu vesileyle, Şekil 9 a-e’de gözüktüğü üzere orifis çapı düşüldükçe dairesele kesitli ön duvara sahip SSS’nin verim artışı da azalmaktadır.

Bir diğer önemli husus da, ön duvar giriş ağzında oluşan ciddi miktardaki çevrinti miktarı aynı zamanda oluşan yüksek miktardaki kayma gerilmelerine de işaret etmektedir. Bu sebeple yıpranmaya daha çok maruz kalacak olan hazne ön duvarı kritik yapı olarak adlandırılmıştır [9]. Kullanılan dairesele kesitli hazne giriş ağzının çevrintileri ve bunun ile birlikte ön duvar kayma gerilmelerini de azaltacağı öngörülebilir. Böylece, verim artışlarına sebebiyet vermesinin yanı sıra, SSS ön duvarının yıpranmaması noktasında da dairesele kesitin fayda sağlayacağı aşikârdır.



Şekil 10. SSS veriminin orifis çapıyla değişimi

Dikkat edileceği üzere dikdörtgen kesit olsun veya dairesele kesit olsun, SSS yapısı verim değerleri orifis çapıyla da ciddi oranda değişmektedir. Şekil 10 orifis çapıyla SSS yapı verimleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Şekil 10 dan da anlaşılacağı üzere düşük orifis çapları için SSS yapısı verimi de düşük olmakta, orifis çapı arttıkça verim değerleri yükselmektedir. Bu gözlemler hem dikdörtgen hem de dairesele kesitli SSS hazneleri için geçerlidir. Orifis çapı 0.04m değerine ulaştığında verimlerde en yüksek değerine ulaşmaktadır. Orifis çapı 0.04m olduğunda ise verim azalmaya başlamaktadır. Bu bulgular ortaya koymaktadır ki dikdörtgen kesit olsun veya dairesele kesit olsun, SSS yapısı en yüksek verim değeri için optimum orifis çapı 0.04 m dir.

Sonuç

Salınlımlı su sütunu (SSS) basit çalışma prensibiyle gelecek vaat eden dalga enerji dönüştürücüler den birisidir. Fakat geleneksel SSS ön duvarı dikdörtgen kesitli olup, altından periyodik olarak giriş çıkış yapan su akımı köşeli ön duvar geometrisi neticesinde akış ayrılmasına sebebiyet vermekte ve ciddi miktarda enerji kayıpları oluşmaktadır. Bu çalışmada ön duvar SSS hazne giriş ağzı için dairesele kesit düşünülmüştür. Hem klasik, hem de dairesele kesitli SSS yapıları fiziksel olarak inşaa edilmiş ve gelen dalga etkisi altında, değişik güç alma yapısı (ör. türbin) sönmüleme miktarları için deneyler yapılarak yapı verimlilikleri hesap edilmiştir. Dairesel kesitli yapının tüm güç alma yapısı (ör. türbin) sönmüleme miktarları için veriminin, klasik kesitli yapıya nazaran arttığı hesaplanmıştır. Maksimum verim artışı, en düşük güç alma (en büyük orifis çapı) yapısı sönmüleme miktarı için yüzde 21.1 olarak gerçekleşmiştir. Ortalama verim artışı ise yüzde 14.22 olarak bulunmuştur. Buda dairesele kesitli ön duvar geometrisinin, akış ayrılmasını ve dolayısı ile oluşacak ve dalga enerjisi giriş ağzını bloke edecek çevrinti ve girdapları önlediğini göstermektedir. Aynı zamanda çevrinti sonucunda meydana gelecek ve yapı ön duvarına zarar verecek kayma gerilmeleri de oluşmayacak ve SSS ömrü uzayacaktır. Ayrıca SSS yapısından maksimum verimi elde edebilmek için gerekli olan optimum orifis çapı parametresinin 0.04m olduğu bulunmuştur.

Bu çalışma dalga enerji dönüştürücülerin hidrodinamik veriminin artması noktasında yapı geometrisinin önemine dikkat çekmektedir. Ayrıca, akış boyunca olabildiğince sert değişimlerden ziyade yumuşak geçişlerin bulunmasının enerji kayıplarını ciddi miktarda azaltacağı öngörülebilmektedir. Bir sonraki çalışma SSS yapısının diğer köşeli bölümlerinin de kavisli bir şekilde inşaa edilerek denenmesi olarak 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.

Kaynakça

- [1] E., Amini, D., Golbaz, R., Asadi, M., Nasiri, O., Ceylan, M.M., Nezhad, M., Neshat, "A comparative study of metaheuristic algorithms for wave energy converter power take-off optimisation: a case study for eastern Australia." *J. Mar. Sci. Eng.* 9, 490, 2021.
- [2] J., Cruz, "Ocean Wave Energy: Current Status and Future Perspectives". Springer Verlag, 2008, Berlin.
- [3] G.H., Keulegan, L.H., Carpenter, Forces on cylinders and plates in an oscillating fluid. *J. Res. Natl. Bur. Stand.* 60 (5), 423–440, 1958.
- [4] G.F., Knott, M.R., Mackley, "On eddy motions near palates and ducts induced by water waves and periodic flows." *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.* 294, 599–628 1412, 1980.
- [5] T., Aderinto, H., Li, "Review on power performance and efficiency of wave energy converters." *Energies* 12, 4329, 2019.
- [6] G., Müller, T., Whittaker, "Visualization of flow conditions inside a shoreline wave power-station." *Ocean Eng.* 22 (6), 629–641, 1995
- [7] I.G., Morrison, "The Hydrodynamic Performance of an Oscillating Water Column Wave Energy" Converter. Ph.D. thesis, University of Edinburg, Edinburg, UK, 1995.
- [8] A., Altunkaynak, A., Çelik, "A novel Geno-Nonlinear formula for oscillating water column efficiency estimation." *Energy* 241 122513, 2022.
- [9] Lopez, I., Castro, A., Iglesias, G., "Hydrodynamic performance of an Oscillating Water Column wave energy converter by means of particle imaging velocimetry." *Energy* 83, 89–103, 2015.
- [10] Rezanejad, K., Gadelho, J.F.M., Xu, S., Guedes Soares, C., "Experimental investigation on the hydrodynamic performance of a new type floating Oscillating Water Column device with dual-chambers." *Ocean Engineering* 234, 109307, 2021.
- [11] Fleming, A., Penesis, I., Macfarlane, G., Bose, N., Denniss, T., "Energy balance analysis for an oscillating water column wave energy converter." *Ocean Engineering* 54, 26–33, 2012.
- [12] Sarmento, A.J.N.A., "Wave flume experiments on two dimensional oscillating water column wave energy devices." *Exp. Fluid* 12, 286–292, 1992.
- [13] Sarmento, A.J.N.A., "Model-test optimization of an OWC wave power plant." *Int. J. Offshore Polar Eng.* 3, No 1, 1993.
- [14] Çelik, A., "An experimental investigation into the effects of front wall geometry on OWC performance for various levels of applied power take off dampings." *Ocean Engineering* 248 110761, 2022.



Araştırma Makalesi / Research Article

Kahramanmaraş depremi sonrası oluşan gaz beton atıkları ile stabilize edilmiş killi kum zeminin geoteknik özelliklerinin araştırılması*Investigation of geotechnical properties of clayey sand soil stabilized with aerted concrete wastes after the Kahramanmaraş earthquake***Muhammet Çınar***Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, muhammetcinar@ksu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5475-7787>

MAKALE BİLGİLERİ

*Makale Geçmişi:*Geliş 13 Aralık 2023
Revizyon 7 Şubat 2024
Kabul 8 Şubat 2024
Online 29 Mart 2024*Anahtar Kelimeler:**Zemin stabilizasyonu,
Killi Kum Zemin,
Kahramanmaraş Depremi,
Gaz Beton Atığı,
Aşşin Elbistan Yüksek Fırın Cürufu.*

ÖZ

Bu çalışmada Kahramanmaraş depremi sonrası oluşan gaz beton (GB) atığı ile killi kumlu zeminlerin geoteknik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Ayrıca bölgede çokça üretilen Aşşin Elbistan yüksek fırın cürufu (AEC) da ilave edilerek etkisi belirlenmiştir. Killi kum zeminin mühendislik özellikleri belirlendikten sonra ağırlıkça %5,%10,%15,%20 oranında GB atığı ve %10 AEC oranı sabit olarak aynı oranlarda GB atığı katılarak karışımlar hazırlanmıştır. Karışımlara sırası ile kıvam limitleri, standart proktor, kesme kutusu, serbest basınç ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyleri yapılmıştır. Yapılana deneylerde doğal zemin içerisine karıştırılan GB atığı oranı artıkça maksimum kuru birim hacim ağırlığın azaldığını ve optimum su içeriğinin ise artığı görülmüştür. Serbest basınç deneyi sonucunda en iyi dayanım %15 GB atığı ve %20 GB +%10 AEC karışımında elde edilmiştir. Doğal zemin ile karşılaştırıldığında sırası ile %30 ve %40 oranında artığı görülmüştür. CBR deneyi sonucuna göre GB atığı ilaveli karışım için %105 ve %10 AEC+ %15 GB atıklı karışımında %156 artış olmuştur. Sonuç olarak, deprem sebebi ile oluşan atık GB ve AEC killi kumlu zeminde kuru ağırlıkça %15 GB atığı ve %10 AEC olarak kullanılması zemin geoteknik özelliklerini iyileştirici yönde etkisi olduğu belirlenmiştir. Ayrıca deprem atığının ve sanayi yan ürün atığının bertarafı ile çevreye ve ekonomiye katkı sağlanacağı sonucuna varılmıştır.

ARTICLE INFO

*Article history:*Received 13 December 2023
Received in revised form 7 February 2024
Accepted 8 February 2024
Available online 29 March 2024*Keywords:**Soil Stabilization,
Clayey Sand Soil,
Kahramanmaraş Earthquake,
Aerated Concrete Waste,
Aşşin Elbistan Blast Furnace Slag*Doi: [10.24012/dumf.1404478](https://doi.org/10.24012/dumf.1404478)

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

In this study, the effect of aerated concrete (AC) waste generated after the Kahramanmaraş earthquake on the geotechnical properties of clayey sandy soils was investigated. Aşşin Elbistan blast furnace slag (AES), which is widely produced in the region, was also added and its effect was determined. After the engineering properties of the clay sand soil were determined, mixtures were prepared by adding 5%, 10%, 15%, 20% AC waste by weight and AC waste in the same proportions with a fixed 10% AES rate. Consistency limits, standard proctor, shear box, unconfined compressive pressure and California Bearing Ratio (CBR) tests were performed on the mixtures respectively. The experiments showed that the maximum dry density decreased and the optimum water content increased as the proportion of AC waste mixed into the natural soil increased. As a result of the unconfined compressive stress test, the best compressive stress value was obtained in the mixture of 15% AC waste and 20% AC + 10% AES. Compared to the natural soil, the increase was 30% and 40%, respectively. According to the CBR test results, there was an increase of 105% for the mixture with AC waste addition and 156% for the mixture with 10% AES + 15% AC waste. As a result, it was determined that the use of 15% AC waste and 10% AES by dry weight in clayey sandy soil due to earthquake-induced waste AC and AES has an effect on improving the geotechnical properties of the soil. It has also been concluded that the disposal of earthquake waste and industrial by-product waste will contribute to the environment and economy.

Giriş

Günümüzde kentleşmenin artması ile beraber daha çok yapı ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Özellikle büyük şehirlerde nüfusun artması ile yapılaşma artmakta ve sürekli yeni alanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Kent sınırları kısıtlı olduğu için mühendislik özelliği yönünden uygun olmayan zeminlere sahip bölgeler kullanıma açılmaktadır. Mühendislik özellikleri yönünden yeterli olmayan zayıf zemin bölgelerine yapılan yapılar ileride ciddi problemlere sebep olmaktadır. Zayıf zeminler, mühendislik açısından dayanımı ve taşıma kapasitesi düşük olan, genellikle yetersiz mukavemet gösteren toprak veya diğer zemin türlerini ifade eder. Zeminin dayanımı, inşaat projeleri için oldukça önemlidir çünkü yapıların sağlam ve güvenli olabilmesi için temel sağlam bir zemin üzerine oturtulması gerekmektedir. Bundan dolayı zayıf zeminler mühendislik özellikleri istenilen seviyeye gelmesi için stabilizasyon veya iyileştirme işlemi yapılmaktadır [1]. Zemin stabilizasyonu, bir zeminin dayanımını artırmak ve mühendislik açısından istenilen özelliklere ulaşmasını sağlamak amacıyla uygulanan bir dizi teknik ve işlemdir. Bu işlemler genellikle zeminin taşıma kapasitesini, su geçirgenliğini, sıkışabilirliğini ve diğer mühendislik özelliklerini iyileştirmeyi amaçlar. Zemin stabilizasyonu, inşaat projeleri için uygun temel koşullarını sağlamak ve yapıların dayanıklılığını artırmak için kullanılır. Günümüzde kimyasal, fiziksel, mekanik, termal, elektro kinetik ve biyolojik olmak üzere bir çok zemin stabilizasyon yöntemleri mevcuttur [2-5].

Zemin stabilizasyon yöntemlerinin bazıları çok maliyetli olmasından dolayı özellikler daha az maliyetli olan çeşitli katkı maddeleri ile zeminin geoteknik özelliklerinin iyileştirmesi son zamanlarda çok tercih edilmektedir. Bunun başlıca sebebi gelişen dünyada endüstriyel yan ürünler ve atık malzemelerin artmasından dolayı ciddi çevre problemlerinin ortaya çıkmasıdır. Zemin stabilizasyonunda bu atıkları kullanılması hem çevreci hemde sürdürülebilirdir. [6,7]. Zemin stabilizasyonunda katkı maddesi olarak kullanılan ürünler bazıları şunlardır; kazan altı külü, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, pirinç kabuğu külü, inşaat yıkıntı atıkları ve mermer tozu gibi çalışmalar literatürde mevcuttur [2,8,9]. Bu atıklar kolay temin edilen, üretimi sürekli, yüksek tonajlı ve maliyeti ucuz olmasından genelde tercih edilmiştir.

Bu çalışmada Kahramanmaraş depremleri sonrası oluşana inşaat yıkıntı atıklarından gaz beton atığı (GB) ve endüstriyel yan ürün olarak ortaya çıkan Afşin Elbistan yüksek fırın cürufu (AEC) farklı oranlarda karıştırılarak dayanımı düşük killi kum zeminin geoteknik özellikleri iyileştirmesi amaçlanmıştır. 6 şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrası yapılan çalışmalarda 350 milyon tonun üzerinde inşaat yıkıntı atığı oluşacağı ve bu atıkların 57 milyon tonu mineral fraksiyon atığının oluşturacağı belirtilmiştir [10]. Ülkemizde gaz beton 2015 yılında yıllık 5.1 milyon m³ üretilmekte ve bunların 4.7 milyon m³ iç piyasada satılmaktadır[11]. Özellikle 2008 ve sonrasında bölgede hem yalıtım hem de işçiliği kolay olması sebebi ile gaz

beton kullanımı ciddi miktarlarda artmıştır. Bundan çıkarımla deprem bölgesinde oluşana mineral fraksiyon atığının %50 den fazlası gaz beton atığı olduğu düşünülmektedir.

Afşin Elbistan Termik Santrali, Türkiye'nin Kahramanmaraş iline bağlı Afşin ve Elbistan ilçelerinde yer alan bir termik santral kompleksidir. Santral, linyit kömüründen elektrik üretimi yapmaktadır ve bu süreç sırasında termik santral cürufu adı verilen yan ürünler oluşmaktadır. Termik santral cürufu, genellikle uçucu olmayan mineral partiküllerden oluşan bir yan üründür. Bu cüruf, kömürün yanması sırasında ortaya çıkan yan ürünlerin bir parçası olarak oluşur. Afşin Elbistan Termik Santrali'nde üretilen yüksek fırın cürufu, genellikle endüstriyel atıklardan kaynaklanan malzeme olup, genellikle inşaat sektöründe kullanılan bir malzeme olarak değerlendirilir. AEC, inşaat sektöründe çeşitli uygulamalarda kullanılabilir. Özellikle beton ve asfalt üretiminde agrega olarak kullanılabilir. Ayrıca AEC içerisindeki yüksek silika, kalsiyum, alüminyum ve oksijen olmasından dolayı zayıf zeminlerin dayanımını artırmak ve stabilizasyonu sağlamak amacıyla kullanılmaktadır[6].

Alpyürür ve Şenol [11] yaptıkları deneysel çalışmada gaz beton, öğütülerek kullanılmış ve farklı zemin tiplerine etkisini araştırılmıştır. Yapılan çalışmada yüksek plastisiteli kil, düşük plastisiteli kil zemin ve kum zemin numuneleri ile 5, 10, 15, 20, 25% karıştırılarak deneyler yapılmıştır. Gaz beton atığı katkısı ile kil zeminlerin serbest basınç mukavemeti ve CBR değerlerinin, kum zeminin ise kayma mukavemeti açısından arttığı belirlenmiştir. Ayrıca yüksek plastisiteli numunesinin şişme basıncı ve şişme yüzdesinde önemli derecede azalmalar tespit edilmiştir. Yapılan bu çalışmada optimum katkı oranları, kil ve kum zeminler için kuru ağırlıkça %10-15 olarak bulunmuştur.

Lakkimsetti ve Nayak [12], çalışmalarında yüksek fırın cürufunu killi zemin özelliklerini iyileştirmek amacı ile kullanmıştır. Zemine kuru ağırlıkça %10 ile %45 arasında farklı oranlarda karıştırarak taşıma gücü ve kayma mukavemeti değerleri belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre en optimum katkı oranı %10 ve üzerindeki karışım oranlarında olduğunu ve serbest basınç dayanımı 2.5 katta kadar arttığı tespit edilmiştir.

Bilici ve diğerleri [13], yaptığı deneysel çalışmada killi bir zemine uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ilave ederek zeminin basınç dayanımını belirlemeye çalışmıştır. Karışıma kireç oranı % 3 sabit tutularak, uçucu kül oranı 3, 6, 9, 12% ve yüksek fırın cürufu oranları 3, 6, 9, 12, 15% olarak farklı oranlarla karışım hazırlanmıştır. Deney sonuçlarına göre en iyi oran %3 kireç + %9 yüksek fırın cürufu karışımında sağlanmıştır. Kür süresine bağlı olarak ise UK katkısının YFC katkılı serilere oranla serbest basınç dayanımı üzerinde çok daha önemli seviyede dayanım artışına neden olduğu belirlenmiştir.

Geçkil ve diğerleri [14], çalışmasında yüksek fırın cürufu ilave ederek killi kumlu zemine etkisi araştırılmıştır. Çalışmada %5 ile %30 aralığında yüksen

fırın cürufu ilave edilerek proktor deneyi, serbest basınç deneyi ve CBR deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre en iyi sonuç %10 yüksek fırın cürufu katkılı karışımda elde edilmiştir. Bu katkı oranında serbest basınç dayanımı ve CBR değeri 1.26 ve 2.06 kat artış gözlemlenmiştir.

Uysal ve diğerleri [15], çalışmasında uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve cam tozu ile stabilize edilmiş ince daneli zeminin mühendislik özelliklerini belirlemektir. İnce daneli zemin, kuru ağırlığının %10, %20, %30, %40 ve %50 oranında atık malzeme kullanılarak stabilize edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, yüksek fırın cürufunun plastisite indisinin azaltılması ve drenajsız kayma mukavemetinin artırılmasında en etkili atık olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, artan silis dumanı oranı ve %20 atık oranından sonra yüksek fırın cürufu ile cam tozunun lineer rötreyi azalttığı tespit edilmiştir.

Avcı ve diğerleri [16], çalışmasında, çok ince taneli yüksek fırın cürufu çimento ile stabilize edilmiş düşük plastisiteli killi zeminin tek eksenli serbest basınç dayanımı, sıkışabilirlik ve şişme potansiyeli gibi bazı geoteknik özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Öncelikle, %8, %10 ve %12 oranlarında çok ince taneli yüksek fırın cürufu çimento ile karıştırılarak elde edilen killi zemin numunelerinin temel geoteknik özellikleri deneysel olarak tespit edilmiştir. Daha sonra, optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında sıkıştırılmış çok ince taneli yüksek fırın cürufu çimento katkılı killi zemin numuneler üzerinde tek eksenli serbest basınç, sıkışabilirlik ve şişme deneyleri yapılmıştır. Deneysel veriler, düşük plastisiteli killi zeminin çok ince taneli yüksek fırın cürufu çimento ile stabilize edilme sonrası, 90. gün sonunda dayanımının açık ortamda bekletilen numunelerde 9 ile 14 kat, streçe sarılı halde bekletilmiş numunelerde 9 ile 12 kat arasında arttığını göstermiştir.

Literatür incelendiğinde gaz beton atıkları için sınırlı çalışma olduğu, yüksek fırın cürufu için ise farklı çalışmalar mevcuttur. Ancak incelenen çalışmalarda gaz beton ve Afşin Elbistan yüksek fırın cürufu beraber kullanılmadığı görülmüştür. Bu çalışmada killi kumlu zemine ağırlıkça 5, 10, 15, 20% oranında gaz beton atığı ve 10% Afşin Elbistan yüksek fırın cürufu sabit tutularak 5, 10, 15, 20% oranında gaz beton atığı ilave edilerek kıvam limitleri, standart proktor deneyi, kesme kutusu deneyi, serbest basınç deneyi ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyi yapılmıştır. Bu çalışmanın temel amacı deprem sonrası oluşana yüksek miktarlardaki atık gaz beton kullanılarak çevre kirliliğini en aza indirmek ve zayıf zeminlerin geoteknik özelliklerini iyileştirmektir. Ayrıca yüksek tonajlarla üretilen Afşin Elbistan yüksek fırın cürufu bertaraf etmek amaçlanmıştır.

Materyal ve Metot

Materyal

Çalışmada kullanılan killi kumlu zemin Kahramanmaraş Onikişubat İlçesi Maarif Mahallesinden alınmıştır. Bu zemin özelliklerini belirlemek için elek analizi, kıvam limitleri deneyleri yapılmıştır. Gaz beton atıkları Kahramanmaraş depreminde hasar görüp

yıkılmış bir binadan alınmıştır. Deneylerde kullanılmak için öğütülmüş ve 2 mm elekten elenerek kullanılmıştır. Afşin Elbistan yüksek fırın cürufu Afşin Elbistan Termik Santralinden temin edilmiştir. Tablo 1 de zeminin fiziksel özellikleri ve Tablo 2 de yüksek fırın cürufun bileşenleri gösterilmektedir.

Tablo 1. Zemin Fiziksel Özellikleri

Özellik	Değer
Tane Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)	26.5
Likit Limit (%)	40
Plastik Limit (%)	23
Plastisite İndeksi (%)	17
Optimum Su İçeriği (%)	20
Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	14.75
Birleştirilmiş Zemin Sistemine Göre Sınıflandırılması	SC

Tablo 2. Afşin Elbistan Yüksek Fırın Cürufunun Bileşenleri

Kimyasal Bileşikler	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	LOI	Özgül Ağırlığı	Blaine İncelik (cm ² /g)
Ağırlıkça (%)	34.5	40	11.15	0.25	9.4	0.1	1.2	0.35	2.98	2.87	4100

Metot

Deneysel çalışmalara başlamadan önce gaz beton atıkları araziden alınarak öğütülmüştür. Daha sonra gaz beton atıkları ve zemin numunesi 24 saat süre ile etüvde kurutulmuştur. Literatürde yapılmış çalışmalar dikkate alınarak zemin içerisine ağırlıkça %5, %10, %15, %20 oranında GB atığı ilave edilmiştir. Daha sonra benzer şekilde %10 AEC sabit tutularak %5, %10, %15, %20 oranında GB atığı ilave edilmiştir[11,14]. Hazırlanan numunelerde kıvam limitleri, standart proktor deneyi, kesme kutusu deneyi, serbest basınç deneyi ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyi yapılmıştır. Deneyler sırası ile önce doğal zeminde daha sonra ikili karışım olarak doğal zemin + GB (5, 10, 15, 20%) ve daha sonra üçlü karışım olarak doğal zemin + %10 AEC + GB (5, 10, 15, 20%) olarak yapılmıştır. Şekil 1 de deneyler için hazırlanan üçlü karışım örneği görülmektedir.



Şekil 1. Gaz Beton ve Afşin Elbistan Yüksek Fırın Cürufu Ekleilmiş Kumlu Kil Zemin Örneği

Çalışmada öncelikle kıvam limitleri deneyi yapılmıştır. Bu deney kapsamında likit limit ve plastik limit belirlenmiştir. Likit limit değerinden plastik limit değeri çıkarıldığında plastisite indeks bulunmuş olur. Kıvam limitleri, zeminin mühendislik özelliklerini anlamak ve tasarım yapmak için kullanılır. Kıvam limitleri, zeminin taşıma kapasitesi, zeminin kuruma çatlama veya şişmesi gibi davranışları anlamak için önemlidir. Özellikle inşaat mühendisliği ve zemin mekaniği projelerinde kullanılan bu limitler, zeminin işlenebilirliği ve taşıma kapasitesi gibi önemli özellikleri değerlendirmek için kullanılır. Kıvam limitleri deneyleri ASTM D4318-10 [17] standardına göre yapılmıştır.

Standart proctor deneyi, zeminin optimum su içeriğini ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı belirlemek amacıyla kullanılan bir laboratuvar deneyidir. Özellikle toprak dolgu malzemelerinin uygun yoğunlukta ve nem içeriğinde yerleştirilmesi için önemli bir testtir. Bu deney, zeminin işlenebilirlik özelliklerini ve taşıma kapasitesini değerlendirmek için kullanılır. Bu çalışmada yapılan standart proctor deneyi, ASTM D698-12 [18] standartlarına göre yapılmıştır.

Standart proctor deneyinden belirlenen optimum su içeriğini ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde numuneler hazırlanarak serbest basınç deneyleri ASTM D2166-16 [19] standardına göre yapılmıştır. Hazırlanan numuneler özenle çapı 50mm boyu 100mm olan kaplardan çıkarılmıştır. Numunelerin boy bölü çap oranı 2 ile 2.5 arasında olması gerekmektedir. Deney başlamadan önce eksenel deformasyon oranı dakikada %1.2 olacak şekilde cihaz bilgi girişi yapılır. Örneklerde deformasyon oranı %15 oluncaya kadar yükleme devam eder ve kırım gerçekleştiğinde test cihazı otomatik durur.

CBR deneyi için numuneler belirlenen optimum su içeriğini ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde hazırlanmıştır. CBR kalıbına yerleştirilen ve tabaka tabaka sıkıştırılan numuneler ASTM D1883-21' e [20] göre gerçekleştirilmiştir. Piston numuneye 2.5 mm ve 5 mm batması sonucu uygulana yükün standarda belirtilen yük e oranlayarak elde edilen yüzde CBR değeri olarak belirlenmiştir. Bulunan iki değerden en yükseği nihaiyi CBR değeri olarak değerlendirilir.

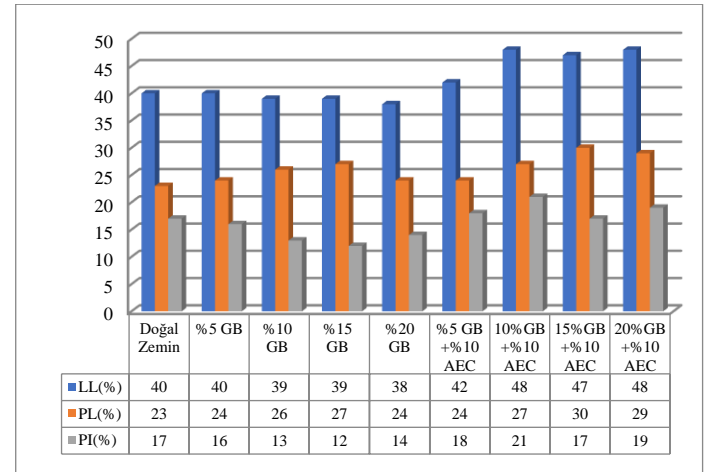
Kesme kutusu deneyi, zeminin kesme direncini değerlendirmek ve zeminin dayanıklılığını anlamak amacıyla yapılan bir deneydir. Bu deney, özellikle zemin mühendisliği ve inşaat projelerinde zeminin taşıma kapasitesini, dayanıklılığını ve davranışını değerlendirmek için kullanılır. Hazırlanan karışımlar 60x60x25 mm boyutlarındaki deney kalıbına yerleştirilmiştir. Deney 0.002 mm/sn yükleme hızında ve ASTM D3080M-11 [21] standartlarında yapılmıştır.

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Doğal zeminin içerisine ağırlıkça %5, %10, %15, %20 oranında GB atığı ilave edilmiştir. Daha sonra benzer

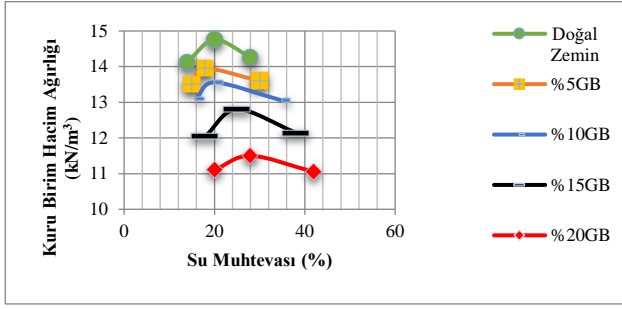
şekilde %10 AEC sabit tutularak %5, %10, %15, %20 oranında GB atığı ilave edilmiştir. Hazırlanan numunelerde kıvam limitleri, standart proctor deneyi, kesme kutusu deneyi, serbest basınç deneyi ve CBR deneyi yapılmıştır.

Sonuçlara göre ikili karışım (GB+killi-kum) likit limit değeri GB atığı oranı artıkça azalmış, plastik limit değeri de atık oranı artıkça arttığı görülmüştür. Bundan dolayı plastisite indeksi de GB atık oranı artıkça azaldığı görülmüştür. Bunun başlıca sebebi GB atığının yüksek oranlarda silis kumundan oluşmasından kaynaklanmaktadır. Yapısı gereği su tutmasından kaynaklı olarak likit limit değerini azaltmıştır. Ayrıca plastisite indeksi düşürerek işlenebilirliği artırdığı görülmüştür. Plastisite indeksi %15 GB karışımında en düşük olarak belirlenmiştir. Literatürde de Alpyür ve Şenol [11] yaptığı çalışmada benzer sonuçlar tespit etmiştir. Üçlü karışım (Killi-kum+%10 AEC+GB) atık oranı artıkça likit limit, plastik limit değeri artmış ve plastisite indeksi %15GB karışımında düştüğü görülmüştür. Kıvam limitleri deneyinde hem ikili karışım hem de üçlü karışım %15 GB karışımı en iyi sonuç verdiği görülmüştür.

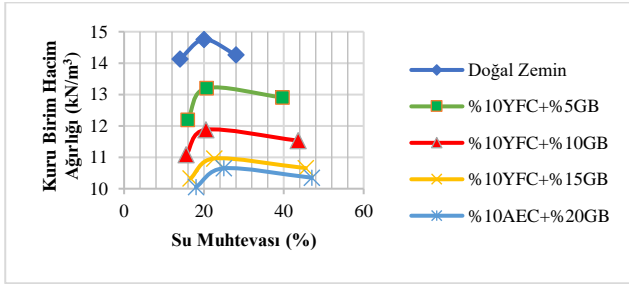


Şekil 2. Kıvam Limitleri Deney Sonuçları

Standart proctor deneyi doğal zemin ve tüm karışım numunelerinde sırası ile yapılmış ve kuru birim hacim ağırlık ve su içerikleri bulunmuştur. Bulunan değerlere göre kompaksiyon eğrileri Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekil 3a ikili karışım ve Şekil 3b üçlü karışım grafikleri incelendiğinde, doğal zemin içerisine karıştırılan GB atığı oranı artıkça maksimum kuru birim hacim ağırlığın azaldığını ve optimum su içeriğinin ise arttığı görülmektedir. Bunun sebebi kıvam limitleri kısmında bahsedildiği gibi GB atığının su emme kapasitesinin fazla olduğundan ve doğal zeminin daha ince taneli ve hafif olmasından kaynaklanmaktadır. İnce daneli ve hafif olan GB atığı doğal zemine eklendikçe kütleyi azalttığı ve çok su emdiği için optimum su içeriğini artırdığı görülmüştür. Benzer sonuçlar literatürde tespit edildiği görülmüştür [11,14].



a.



b.

Şekil 3. Standart Proctor Deneyi Kompaksiyon Eğrileri
a. Killi-Kum+GB Atığı b. Killi-Kum+%10 AEC+GB Atığı

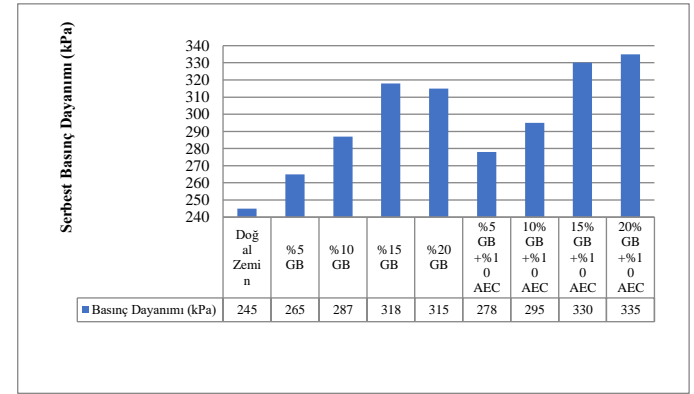
Kesme kutusu deneyi kumlu zeminlerin kayma direncini, içsel sürtünme açısı ve kohezyonları belirlemede kullanılan bir deneydir. Karışımların içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri optimum su muhtevasında hazırlandıktan sonra değerler hesaplanarak Tablo 3 gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde GB atığı tek başına ilave edilen zeminlerde %15 katkı oranına kadar içsel sürtünme açısının arttığı gözlemlenmiştir. Fakat üçlü karışımlarda içsel sürtünme açısı ilave GB atığı ile düştüğü görülmüştür. GB atığının ilave edildiği durumda içsel sürtünme açısının artmasının başlıca sebebi GB'nin silis kumundan imal edilmiş olmasından kaynaklı olarak artırdığı düşünülmüştür. AEC ilaveli üçlü karışımda çok etki etmemesi ve düşmesinin sebebi de AEC tanelerinin daha ince ve yuvarlak yapıya sahip olmasından dolayı içsel sürtünme açısını azaltmış ve kohezyonu da artırdığı görülmüştür.

Tablo 3. Karışımların İçsel Sürtünme Açısı ve Kohezyon Değerleri

	Doğal Zemin	%5 GB	%10 GB	%15 GB	%20 GB	%5 GB +%10 AEC	10%GB +%10 AEC	15%GB +%10 AEC
İçsel Sürtünme Açısı(ϕ)	40	41	42	43	40	41	35	35
Kohezyon (c, kPa)	19.3	18.1	17.5	17.2	16.8	11.7	23.8	18.7

Serbest basınç deney sonuçları Şekil 4 gösterilmiştir. Serbest basınç deneyi için her bir numuneden üç tane hazırlanmıştır. Deneyler 7 günlük kür süresi için yapılmıştır. Doğal zemin kumlu killi bir zemin olduğu için basınç dayanımı 245 kPa olarak bulunmuştur. GB atığı ilavesi ile beraber serbest basınç dayanımı arttığı

görülmüştür. En yüksek değer 318 kPa ile %15 GB atığı karışımında elde edilmiştir. Doğal zemin dayanım değeri ile karşılaştırıldığında %30 artış gözlemlenmiştir. Doğal zemin killi kumlu bir zemin olduğu için içerisindeki kil zeminin bir arada tutmayı sağlamış ama GB atığı ilavesi artması ile beraber gevrek davranış gözlemlenmiştir. Üçlü karışımlarda AEC etkisi ile beraber serbest basınç deney sonuçları sadece GB atığı ile yapılmış numunelere göre daha iyi çıktığı görülmüştür. En yüksek değeri 335 kPa olarak %20 GB +%10 AEC karışımından elde edilmiştir. Ayrıca doğal zemin serbest basınç değeri ile karşılatıldığında %40 bir artış olduğu görülmüştür. Bu artışın başlıca sebebi AEC'nin içerisindeki CaO değerinin yüksek olmasından dolayı puzolanik bir malzeme olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Literatüre bakıldığında Geçkil ve diğerleri [14] benzer sonuçlar bulduğu görülmüştür.



Şekil 4. Karışımlara Göre Serbest Basınç Dayanımı Sonuçları

Serbest basınç deneyi ve diğer deneylerde en iyi sonuçlar ikili ve üçlü karışımların %15 GB atığı katkılı sonucu olduğundan CBR deneyleri için 7 günlük kür süresi için doğal zemin, %15 GB atığı+Doğal Zemin ve %15 GB atığı+%10 AEC+ Doğal zemin numuneleri hazırlanarak deneyler yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre 2.5mm ve 5mm batma değerleri en yüksek değerlendirmeye alınarak doğal zemin %6.55, %15 GB atıklı karışımda %13.5 ve %15 GB atığı+%10 AEC için %16.8 olarak bulunmuştur. Doğal zemin sonucuna göre artış GB atığı ilaveli karışım için %105 ve %10 AEC+%15 GB atıklı karışımda %156 olarak bulunmuştur. Deney sonuçları Tablo 4 gösterilmiştir. Literatürde araştırıldığında daha önceki yapılmış CBR deney sonuçlarına göre Look [22] bir çalışma yapmıştır. Look [22] göre CBR yüzdelere göre yol alt dolgu malzemesi olarak kullanılıp kullanılmayacağını değerlendirmiştir. Çalışmaya göre CBR sonuçları <%1 ise son derece zayıf, %1-%2 arasında ise çok zayıf, %2-%3 zayıf, %3 ile %10 arası orta, %10 ile %30 arası güçlü (alt temel dolgusu olarak kullanılabilir), >%30 Çok güçlü (Alt temel- temel- dolgu malzemesi olarak kullanım uygundur.) olarak değerlendirmiştir. Look [20] sonuçlarına göre %15GB ve %15GB+%10AEC karışımları ilave edildiğinde doğal zemin alt temel dolgusu olarak kullanıla bileceği görülmüştür [23].

Tablo 4. Doğal Zemin, %15 GB atığı ve %15 GB atığı +%10 AEC numunelerin CBR deneyi sonuçları

	CBR (%)	
	2.5 mm batma	5 mm batma
Doğal Zemin	6.55	6.05
% 15 GB	13.5	12.6
15%GB +%10 AEC	16.8	16.2

SONUÇLAR

Killi-kumlu zeminin geoteknik özellikleri belirlemek üzere farklı oranlarda ilave edilerek hazırlanmış depremden sonra ortaya çıkan gaz beton atığı ve Afşin Elbistan yüksek fırın cürufu karışımların etkisi araştırılmıştır. Yapılan kıvam limitleri, standart proktor, kesme kutusu, serbest basınç ve CBR deneylerinin sonuçları aşağıda belirtilmiştir.

- İkili karışım (GB+killi-kum) likit limit değeri GB atığı oranı arttıkça azalmış, plastik limit değeri de atık oranı arttıkça arttığı görülmüştür. Bundan dolayı plastisite indeksi de GB atık oranı arttıkça azaldığı görülmüştür. Üçlü karışım (Killi-kum+%10 AEC+GB) atık oranı arttıkça likit limit, plastik limit değeri artmış ve plastisite indeksi %15GB karışımında düştüğü görülmüştür. Kıvam limitleri deneyinde hem ikili karışım hemde üçlü karışım %15 GB karışım için en iyi sonuç verdiği görülmüştür.
- Standart proktor deneyi sonuçlarına göre, doğal zemin içerisine karıştırılan GB atığı oranı arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlığın azaldığını ve optimum su içeriğinin ise arttığı görülmektedir.
- Kesme kutusu deneyine göre GB atığı tek başına ilave edilen zeminlerde %15 katkı oranına kadar içsel sürtünme açısının arttığı gözlemlenmiştir. Fakat üçlü karışımlarda içsel sürtünme açısı ilave GB atığı ile düştüğü görülmüştür. AEC tanelerinin daha ince ve yuvarlak yapıya sahip olmasından dolayı içsel sürtünme açısını azaltmış ve kohezyonu da artırdığı görülmüştür.
- Serbest basınç deneyi 7 günlük kür süresi için yapılmış ve doğal zemin kumlu killi bir zemin olduğu için basınç dayanımı 245 kPa olarak bulunmuştur. GB atığı ilavesi ile beraber serbest basınç dayanımı arttığı görülmüştür. En yüksek değer 318 kPa ile %15 GB atığı karışımında elde edilmiştir. Doğal zemin dayanım değeri ile karşılaştırıldığında %30 artış gözlemlenmiştir. Üçlü karışımlarda AEC etkisi ile beraber serbest basınç deney sonuçları sadece GB atığı ile yapılmış numunelere göre daha iyi çıktığı görülmüştür. En yüksek değeri 335 kPa olarak %20 GB +%10 AEC

karışımından elde edilmiştir. Ayrıca doğal zemin serbest basınç değeri ile karşılaştırıldığında %40 bir artış olduğu görülmüştür.

- CBR deney sonuçlarına göre doğal zemin %6.55, %15 GB atıklı karışımında %13.5 ve %15 GB atığı+%10 AEC için %16.8 olarak bulunmuştur. Doğal zemin sonucuna göre artış GB atığı ilaveli karışım için %105 ve %10 AEC+ %15 GB atıklı karışımında %156 olarak bulunmuştur. Look [22] sonuçlarına göre karşılaştırıldığında %15GB ve %15GB+%10AEC karışımları ilave edildiğinde doğal zemin alt temel dolgusu olarak kullanılabileceği görülmüştür.

Sonuç olarak, deprem sebebi ile oluşana atık gaz betonun ve Afşin Elbistan yüksek fırın cürufunun killi kumlu zeminde kuru ağırlığına %15 gaz beton atığı ve %10 yüksek fırın cürufu olarak kullanılması zemin geoteknik özelliklerini iyileştirici yönde etkisi olduğu belirlenmiştir. Ayrıca deprem atığının ve sanayi yan ürün atığının bertarafı ile çevreye ve ekonomiye katkı sağlanacağı sonucuna varılmıştır.

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.

Kaynaklar

- [1] M Çınar, ve B. Erbaşı, “Geoteknik Uygulamalarda Geopolimerlerin Kullanılabilirliğinin İncelenmesi, Literatür Çalışması”, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(4), 774-789, 2022.
- [2] H.Canakci, A. Aram and F. Celik, “Soil stabilization of clay with lignin, rice husk powder and ash”, *Geomechanics and Engineering*, 8,1, 67-79, 2015.
- [3] M. Çınar ve K. Erbaşı, “Zemin İyileştirmesinde Kullanılan Jet Grout Yönteminde Çimento Yerine İkame Edilen Atık Malzemelerin Mekanik ve Reolojik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi: Literatür Araştırması”, *OKÜ Fen Bil. Ens. Dergisi*, c. 6, sy. 2, ss. 1742–1767, 2023.
- [4] F. Çelik, M. Çınar, and O. Akcuru, “Utilization of waste bottom ash as mineral additive with partial replacement of cement in geotechnical grouting works based on mechanical features”, *Arabian Journal of Geosciences* 15,14, 1290, 2022.
- [5] W. S. Sidik, H. Canakci, I. H. Kilic, and F. Celik, “Applicability of bio cementation for organic soil and its effect on permeability” *Geomech Eng*, 7(6), 649-663, 2014.
- [6] M. Şahin, M. Mahyar, and S. T. Erdoğan, “Afşin Elbistan uçucu külü ve yüksek fırın cürufu içeren çimentosuz bağlayıcılar hazırlanması.” *In Proc.*, 9th

- National Concrete Congress*, 2015, April, pp. 181-190.
- [7] M. Çınar, Utilization of Earthquake Demolition Wastes and Afşin-Elbistan Fly Ash for Soil Improvement After Kahramanmaraş Earthquake (6 February 2023). *Sustainability*, 16(2), 538, 2024.
- [8] H. Güllü, and H. İ. Fedakar, "Use of factorial experimental approach and effect size on the CBR testing results for the usable dosages of wastewater sludge ash with coarse-grained material" *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 22(1), 42-63, 2018.
- [9] M. Çınar, M. Karpuzcu and H. Çanakçı, "The measurement of fresh properties of cement-based grout containing waste marble powder", *Measurement*, 150, 106833, 2020.
- [10] G. Doğdu, and S. N. Alkan, "Deprem Sonrası Oluşan İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Değerlendirilmesi: 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri" *Artvin Çoruh Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 1.1, 38-50, 2023.
- [11] M. Alpyürür, and Ş. Aykut, "Yüzeysel zemin iyileştirmesinde yeni bir malzeme olarak atık gazbeton kullanımı", *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9.2, 168-178, 2018.
- [12] B. Lakkimsetti, and N. Sitaram, "Experimental Investigation and Performance Evaluation of Lithomargic Clay Stabilized with Granulated Blast Furnace Slag and Calcium Chloride", *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 8.1, 12, 2022.
- [13] H. Bilici, D. V. Okur, M. Türköz, ve H. Savaş, "Kil Zeminin Dayanımı Üzerinde Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılarının Etkisi ve Karşılaştırmalı Analizi", *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, c. 9, sy. 2, ss. 910–919, 2020, doi: 10.17798/bitlisfen.598525.
- [14] T. Geçkil, T. Sarıç, ve Ö. N. Çetkin, "Killi Kum Zeminlerin Dayanımı Üzerinde Yüksek Fırın Cürufunun Etkileri", *OKÜ Fen Bil. Ens. Dergisi*, c. 6, sy. 2, ss. 1159–1174, 2023.
- [15] F. Uysal, V. Yılmaz, ve H. M. Topçu, "Farklı Atık Malzemeler ile Stabilize Edilmiş İnce Daneli Zeminin Mühendislik Özellikleri", *Çukurovaummfd*, vol. 35, no. 1, pp. 19–26, 2020, doi: 10.21605/cukurovaummfd.764507.
- [16] E. Avcı, M. Mollamahmutoglu, E. Deveci, ve A. Gökçe, "Çok ince taneli yüksek fırın cürufu çimento ile stabilize edilmiş düşük plastisiteli killi zeminin mühendislik özellikleri", *GUMMFD*, vol. 36, no. 2, pp. 985–996, 2021, doi: 10.17341/gazimmfd.642402.
- [17] Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA. ASTM D4318-10, 2010.
- [18] Standart Test Methods for Laboratory Compaction Characteristic of Soil Using Standart Effort. ASTM International. West Conshohocken, PA. ASTM D698-12, 2012.
- [19] Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, ASTM International, West Conshohocken, PA. ASTM D2166/D2166M-16, 2016.
- [20] Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA. ASTM D1883-21, 2021.
- [21] Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, ASTM International, West Conshohocken, PA. ASTM D3080/D3080M-11, 2011.
- [22] Look, B. Handbook of Geotechnical Investigation and Desing Tables. Netherlands: Taylor Francis, 2007, 157.
- [23] M. Tanyıldızı ve M. Çınar, "The Effect of The Bearing Capacity of Sub-Grade Soil on The Thickness and Cost of The Superstructure of Chip Seals", *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, c. 12, sy. 2, ss. 376–386, 2023, doi: 10.17798/bitlisfen.1213673.